

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ
(*Mention Sciences*)

PAR

YVES CAVAILLÉ

1^{re} THÈSE

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE L'ÉCOULEMENT VARIABLE
ACCOMPAGNANT LA VIDANGE BRUSQUE D'UNE RETENUE

2^e THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

LES HYDROCYCLONES

Soutenues, le 7 juin 1962, devant la Commission d'Examen

Jury	{	MM. FORTIER	{	<i>Président.</i>
		SIESTRUNCK		<i>Examineurs.</i>
		COMOLET		
		MARTINOT-LAGARDE		
		VALEMBOIS		

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ
(*Mention Sciences*)

PAR

YVES CAVAILLÉ

1^{re} THÈSE

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE L'ÉCOULEMENT VARIABLE
ACCOMPAGNANT LA VIDANGE BRUSQUE D'UNE RETENUE

2^e THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

LES HYDROCYCLONES

Soutenues, le 7 juin 1962, devant la Commission d'Examen

Jury	{	MM. FORTIER	{	<i>Président.</i>
		SIESTRUNCK		<i>Examineurs.</i>
		COMOLET		
		MARTINOT-LAGARDE		
		VALEEMBOIS		



CONTRIBUTION
A L'ÉTUDE DE L'ÉCOULEMENT VARIABLE
ACCOMPAGNANT
LA VIDANGE BRUSQUE D'UNE RETENUE

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

Doyen M. ZAMANSKY

PROFESSEURS

G. JULIA	T	Analyse supérieure et algèbre supérieure.	JACQUINOT	T	Spectroscopie et physique céleste (Orsay).
PRENANT	T	Anatomie et histologie comparée.	VASSY	T	Physique de l'atmosphère.
GRASSÉ	T	Évolution des êtres organisés.	DESTOUCHES	T	Théorie physique.
PRÉVOST	T	Chimie organique.	AMIEL	T	Chimie générale.
WYART	T	Minéralog. et cristal.	HOCART	T	Minéralogie et cristallog.
TEISSIER	T	Zoologie.	J.-P. MATHIEU	T	Physique (optique).
MANGENOT	T	Biologie végétale (Orsay).	COUTEAUX	T	Cytologie.
AUGER	T	Physique quantique et relativité.	MAY	T	Zoologie (Orsay).
MONNIER	T	Physiologie générale.	CHOQUET	T	Théorie des fonctions et topologie.
PIVETEAU	T	Paléontologie.	FELDMANN	T	Biologie végétale marine.
ROCARD	T	Physique (E.N.S.).	GUINIER	T	Physique des solides (Orsay).
CARTAN	T	Mathématiques (E.N.S.).	JOST	T	Physiologie comparée.
LAFFITTE	T	Chimie générale.	FORTET	T	Calcul des probabilités et physique mathématique.
FAYARD	T	Géométrie supérieure.	SCHWARTZ	T	Calcul diff. et intégral.
COULOMB	T	Physique du globe.	CHOUARD	T	Physiologie végétale.
M ^{lle} COUSIN	T	Biologie animale (S.P.C.N.).	MALAVARD	T	Aviation (tech. aéronaut.).
CHRÉTIEN	T	Chimie minérale.	BRELOT	T	Calcul diff. et intégral.
DRACH	T	Zoologie.	NORMANT	T	Synthèse organique.
KASTLER	T	Physique (E.N.S.).	BENARD	T	Chimie minérale.
EPHRUSSI	T	Génétique.	BUVAT	T	Botanique (E.N.S.).
RIVIERE	T	Géologie (S.P.C.N.) et sédimentologie (Orsay).	DUGUE	T	Statistiques mathématiques.
GAUTHERET	T	Biologie végétale (P.C.B.).	SOULAIRAC	T	Psychophysiologie.
LUCAS R.	T	Recherches physiques.	ULRICH	T	Physiologie vég. appliquée.
THOMAS A.	T	Biologie cellulaire.	MARÉCHAL	T	Optique théorique et appl.
ARNULF	T	Optique appliquée.	KIRRMANN	T	Théories chimiques.
MORAND	T	Physique enseignement.	CHADEFAUD	T	Botanique.
SOLEILLET	T	Physique (P.C.B.).	M ^{lle} LE BRETON	T	Physiologie de la nutrition.
FORTIER	T	Mécanique exp. des fluides.	LELONG	T	Application de l'analyse à la géométrie.
PETIT	T	Biologie maritime.	DEVILLERS	T	Anatomie et histol. comparées.
QUENEY	T	Météorologie et dynamique atmosphérique.	DEVILLERS	T	Anatomie et histol. comparées.
GALLIEN	T	Embryologie.	EHRESMANN	T	Topologie algébrique.
EICHHORN	T	Botanique.	FRANCON	T	Physique (S.P.C.N.).
DE CUGNAC	T	Biologie végétale (S.P.C.N.).	GLANGEAUD	T	Géographie phys. et géologie.
M ^{lle} CAUCHOIS	T	Chimie physique.	GODEMENT	T	Mathématiques (M.G.P.).
THELLIER	T	Physique du globe.	PISOT	T	Tech. math. de la phys.
L'HÉRITIER	T	Biologie générale (Orsay).	ROCH	T	Géologie.
GRIVET	T	Radio-électricité (Orsay).	SCHATZMANN	T	Astrophysique.
PONCIN	T	Mécanique générale.	TERMIER	T	Géologie générale.
DUBREIL	T	Arithmétique et théorie des nombres.	ZAMANSKY	T	Mathématiques générales.
QUELET	T	Chimie organique.	LENNUIER	T	Physique (M.G.P.).
CAGNIARD	T	Géophysique appliquée.	RIZET	T	Génétique (Orsay).
CHAMPETIER	T	Chimie macromoléculaire.	ROUTHIER	T	Géologie appliquée.
CUVILLIER	T	Micropaléontologie.	M ^{me} TONNELAT	T	Physique théorique.
JUNG	T	Géologie.	DIXMIER	T	Mathématiques (M.P.C.).
TRILLAT	T	Microscopie et diffraction électronique.	SOUCHAY	T	Chimie générale.
WIEHMANN	T	Chimie organique et struc.	AIGRAIN	T	Électrotechnique générale.
			BRUSSET	T	Chimie systématique.
			M. LÉVY	T	Physique théorique des hautes énergies (Orsay).

M ^{me} CHAIX	T	Chimie biologique.	DE POSSEL	T	Analyse numérique.
M ^{me} HUREL-PY. .	T	Biologie végétale (P.C.B.).	CHARLOT	T	Chimie analytique.
PIAUX	T	Chimie (M.P.C.).	LEMÉE	T	Écologie végétale (Orsay).
BRUN	T	Mécanique théorique des fluides.	GUÉRIN	T	Chimie (M.P.C.) (Orsay).
LEDERER	T	Chimie biologique (Orsay).	CHATELET M. .	T	Chimie (P.C.B.).
M ^{me} DUBREIL .	T	Mathématiques (Agrég.).	JEAN	T	Physique nucl. (Orsay).
M ^{me} LELONG . .	T	Mathématiques II (E.N.S.).	MATTLER	T	Physique (S.P.C.N.).
BELLAIR	T	Géologie (S.P.C.N.).	BERGERARD . .	T	Zoologie (Orsay).
COTTE.....	T	Physique électricité.	BERTEIN	T	Électronique (Orsay).
DUBOIS J.-E. .	T	Chimie organique.	BOUSSIÈRES . .	T	Radiochimie.
LAMOTTE	T	Zoologie (E.N.S.).	M ^{me} COUTURE..	T	Thermo. et méc. physique.
MICHEL A.	T	Chimie minérale (Orsay).	ELLENBERGER..	T	Géologie des grandes régions du globe.
OLMER	T	Énergétique générale.	FRANC	T	Biologie animale (P.C.B.).
ROUAULT	T	Électricité (Orsay).	SCHNELL		Botanique tropicale.
GAUTHIER	T	Mécanique appliquée.	STOLKOWSKI . .	T	Physiologie végétale.
BARCHIEWITZ .	T	Chimie physique.	ACHER	T	Chimie biologique.
BROSSEL.....	T	Physique atomique.	BAUDOIN		Biologie animale (P.C.B.).
BUSER	T	Physiologie comparée.	BEAUMONT.....		Biologie animale (S.P.C.N.).
CAMUS	T	Physiologie vég. (Orsay).	BLAMONT	T	Géophysique-ionosphère.
CASTAING	T	Physique II thermo. (Orsay).	BOURREAU	T	Botanique.
CURIEN	T	Minéralogie et cristallog.	CURIE D.....		Physique (M.G.P.).
MOYSE	T	Physiologie végétale (Orsay).	DURAND-DELGA	T	Géologie.
NOIROT	T	Évolution des êtres org.	FREON	T	Chimie organique (Orsay).
PANNETIER	T	Chimie générale.	HELLER	T	Physiologie végétale.
POSSOMPES	T	Zoologie.	TORTRAT	T	Calcul des probabilités.
PULLMANN.....	T	Chimie quantique.	CAILLEUX	T	Géologie (S.P.C.N.).
TEILLAC	T	Physique nucl. et radio-activité (Orsay).	MAGNAN.....	T	Physique (S.P.C.N.).
TONNELAT	T	Biol. physico-chim. (Orsay).	DAUDEL	T	Mécanique ondulatoire appliq. à la chimie théorique et à la physique nucléaire.
VILLE	T	Économétrie.	M ^{lle} FOURCROY. .	T	Biologie végétale (S.P.C.N.).
WILLEMART . .	T	Chimie (P.C.B.).	M ^{me} CHOQUET-BRUHAT..		Mécanique analytique et mécanique céleste.
DODE	T	Chimie (Orsay).	M ^{lle} VEIL.....	T	Physiologie générale.
FREYMANN	T	Recherches physiques.	LWOFF	T	Microbiologie.
GUINOCHET ...	T	Biol. vég. (S.P.C.N.) (Orsay).	SIESTRUNCK....	T	Mécan. phys. et expér.
ROLLET	T	Chimie minérale.	LACOMBE	T	Métallurgie des métaux nucléaires (Orsay).
M ^{lle} JOSIEN ...	T	Chimie (S.P.C.N.).	BROCHARD	T	Physique (P.C.B.) (Orsay).
CHEVALLEY ...	T	Géométrie algéb. et théorie des groupes.	CABANNES	T	Mécanique générale.
M ^{lle} JOSIEN ...	T	Chimie (S.P.C.N.).	LESIEUR.....	T	Mathématiques I (Orsay).
ARNOULT	T	Électronique (Orsay).	MAZET	T	Mécanique générale (Orsay).
CHAPELLE	T	Physique I (Orsay).	CAIRE		Géographie phys. et géol. dynamique.
DELANGE	T	Mathématiques I (Orsay).	COMOLET	T	Mécanique des fluides.
DENY	T	Mathématiques génér. (Orsay).	CORABEUF.....	T	Physiol. animale (Orsay).
GERMAIN	T	Mécanique théor. des fluides.	DELLOUE		Physique de l'exosphère.
LUCAS G.	T	Géologie.	GORENFLOT ...		Botanique II (Orsay).
ALLARD	T	Chimie physique.	HOUILLOIN ...		Biologie animale (P.C.B.).
BERTHELOT ...	T	Phys. des particules fondamentales (Orsay).	JULLIEN J.		Chimie (S.P.C.N.) (Orsay).
BRICARD	T	Météor. et physique de l'atmosphère.	MALGRANGE ...	T	Technique math. de la physique (Orsay).
M ^{me} ALBE-FESSARD..	T	Psycho-physiologie.	OLIVIER		Antropologie.
FRIEDEL	T	Physique des solides (Orsay).	NOZERAN	T	Botanique II (Orsay).
M. JULIA	T	Études des moléculaires complexes.	BLANC-LAPIERRE	T	Physique (E.N.S.) (Orsay).
LENDER	T	Biol. anim. (S.P.C.N.) (Orsay).	CHEVAUGEON ..	T	Botanique (Orsay).
MAGAT	T	Physico-chimie des radio-éléments.	KAHANE.....	T	Mathématiques (Orsay).
M ^{lle} QUINTIN . .	T	Électrochimie.	SAMUEL	T	Mathématiques fém. (E.N.S.).
MONOD	T	Chimie du métabolisme.	KOURGANOFF ...	T	Astronomie (Orsay).
BENOIT.....	T	Physiol. animale (Orsay).	THIRY	T	Mécanique céleste.

ABELES		Physique (S.P.C.N.).
AMAT	T	Physique (P.C.B.).
AUBOIN	T	Géologie.
M ^{me} BENOIT- GUEUTAL ..	T	Phys. nucléaire et radio- activité (Orsay).
BOUGIS		Biologie marine (Villefranche- sur-Mer).
BRUHAT	T	Mathématiques (M.P.C.).
BRUNN	T	Géologie historique (Orsay).
CHABBAL	T	Physique (M.G.P.) (Orsay).
DEHEUVELS ...	T	Mathématique propé.
D'ESPAGNAT ..	T	Physique théorique (Orsay).
FURON	T	Géologie (S.P.C.N.).
M ^{me} GANS	T	Génétique.
GENEVES		Biologie végétale (P.C.B.).
GUILBERT		Physique (C.U.S.) (Orléans).
HUPE	T	Pétrographie.
HOLLANDE.....	T	Biologie générale.
LIONS	T	Analyse numérique.
MAITTE	T	Chimie (P.C.B.).
MEYER		Physique propédeutique.
NICOLAS		Géologie appliquée.
PANIGEL		Biologie générale.
RAVIER		Pétrographie.
ROSEAU	T	Méc. théor. des fluides.
ROUBINE	T	Électronique.
SILBER	T	Chimie (P.C.B.).
UEBERSFELD ..	T	Électronique.
YVON	T	Théories physiques.
HERVÉ	T	Mathématiques.
NÉRON	T	Mathém. (M.P.C.) (Orsay).
M ^{me} PECKER- WIMEL ..	T	Astrophysique.
BALKANSKY ...		Physique (M.P.C.).
LE CORRE	T	Électricité.
DELCROIX	T	Physique théorique (Orsay).
GOURDIN		Phys. théor. des hautes- énergies (Orsay).
LEHMANN	T	Phys. exp. des hautes énergies (Orsay).
NATAF	T	Physique nucléaire et radio- activité (Orsay).
ÉCHALIER		Biologie animale (P.C.B.).
BARRAUD		Physiologie cellulaire.
LIORET		Physiologie végét. (Orsay).
DARS		Géologie struct. et géol. appliquée.
CAMEFORT	T	Botanique (agrégation).
VICHNIEWSKY .	T	Mécanique industrielle.
BLAQUIERE		Électronique (Orsay).
ARNOUS	T	Physique théorique.
TATIBOUET		Chimie (C.S.U.) (Orsay).
MALLIAVIN	T	Mathématique propé. (Orsay).
GAUDEMAR		Chimie propédeutique.
PÉREZ Y JORBA .		Phys. exp. des hautes énergies (Orsay).
DAVID	T	Chimie (agrég.) (Orsay).
BROUSSE	T	Mécanique théorique.
ROSCH	T	Astronomie.

Secrétaire général R. POUILLAIN



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41552023_0025

Nous exprimons notre profonde gratitude à M. le Professeur FORTIER qui nous a fait le grand honneur d'assurer la direction scientifique de nos recherches.

Nous remercions vivement MM. les Professeurs SIESTRUNCK, MARTINOT-LAGARDE, COMOLET, ainsi que M. VALEMBOS d'avoir bien voulu accepter de faire partie de notre jury.

Nos remerciements vont également à la Direction des Études et Recherches d'Électricité de France qui nous a permis de conduire cette étude dans ses Laboratoires.

Notre gratitude va à M. FAURE, Chef de Département au Centre de Recherches et d'Essais de Chatou qui nous a prodigué ses conseils.

Remercions M^{lle} P. COURSEAU dont la recherche bibliographique nous a été précieuse et M. P. NAPIE qui a apporté beaucoup d'ingéniosité et de soin à la réalisation de l'appareillage expérimental et à l'exploitation des mesures.

TABLE DES MATIÈRES

	PAGES
NOTATIONS	1
CHAPITRE PREMIER	
1 Étude bibliographique	5
1,1 Théorie générale des écoulements graduellement variables	5
1,2 Applications de la théorie des écoulements graduellement variables aux écoulements accompagnant la vidange brusque d'une retenue	6
1,21 Intégration analytique	7
1,22 Intégration numérique ou graphique	9
1,23 Étude théorique de l'écoulement au voisinage immédiat de la section de vidange brusque d'une retenue	10
1,3 Écoulements accompagnant la vidange brusque d'une retenue en présence d'un tirant d'eau initial aval	10
1,4 Expérimentation	11
1,41 Propagation de fronts raides	11
1,42 Écoulements accompagnant la vidange brusque d'une retenue....	11
1,5 Problèmes non résolus	12
CHAPITRE II	
2 Théorie sans perte de charge ni pente en canal prismatique de section rectangulaire	15
2,1 Écoulements sur fond initialement sec	15
2,2 Écoulements sur tirant d'eau initial.....	19
CHAPITRE III	
3 Étude expérimentale	23
3,1 Programme	23
3,2 Dispositif expérimental	23
3,21 Canal d'essais	23
3,22 Appareillage de mesure des pertes de charge	24
3,23 Appareil assurant la vidange brusque d'une retenue.....	24
3,24 Appareillage de mesure des profondeurs et vitesses, en fonction de l'abscisse et du temps	28

	PAGES
3,3 Caractéristiques de pertes de charges présentées par le canal d'essai.....	33
3,31 Fond lisse	33
3,32 Fond rugueux	33
3,4 Essais préliminaires d'écoulements variables	34
3,41 Fonctionnement de la vanne	34
3,42 Photographies du début de l'écoulement.....	35
3,43 Contrôle des indications de cote lues sur les clichés photographiques.	35
3,44 Contrôle de fidélité de l'écoulement	35
3,45 Mesure de l'influence sur l'écoulement du temps d'effacement de la vanne	35
3,5 Essais sur fond lisse	36
3,51 Résultats bruts des mesures	36
3,52 Lignes d'eau instantanées	37
3,53 Vitesses d'écoulement	37
3,6 Essais sur fond rugueux	38
3,61 Résultats bruts des mesures	39
3,62 Lignes d'eau instantanées	39
3,63 Vitesses d'écoulement	39
3,7 Présentation adimensionnelle des résultats d'essais en présence des résultats théoriques correspondants sans perte de charge. Comparaison avec les résultats expérimentaux de R. F. DRESSLER.....	40
3,71 Trajectoires des fronts d'ondes	40
3,72 Lignes d'eau	41
3,73 Répartitions longitudinales des vitesses moyennes spatiales	41
3,74 Répartitions longitudinales des nombres de FROUDE	41
3,8 Phénomènes superposés à l'écoulement d'ensemble	42
3,81 Surélévation locale à l'aval de la vanne	42
3,82 Ondes secondaires de FAVRE	42
Conclusions	44
ANNEXE I. — Tableaux de résultats	47
ANNEXE II. Planches	73
BIBLIOGRAPHIE	165

NOTATIONS

GRANDEURS DIMENSIONNELLES

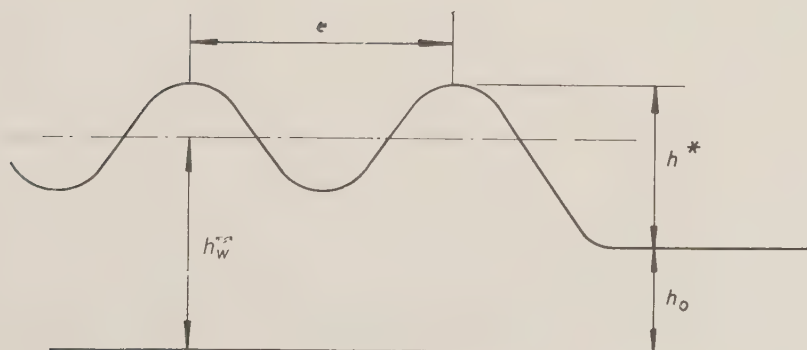
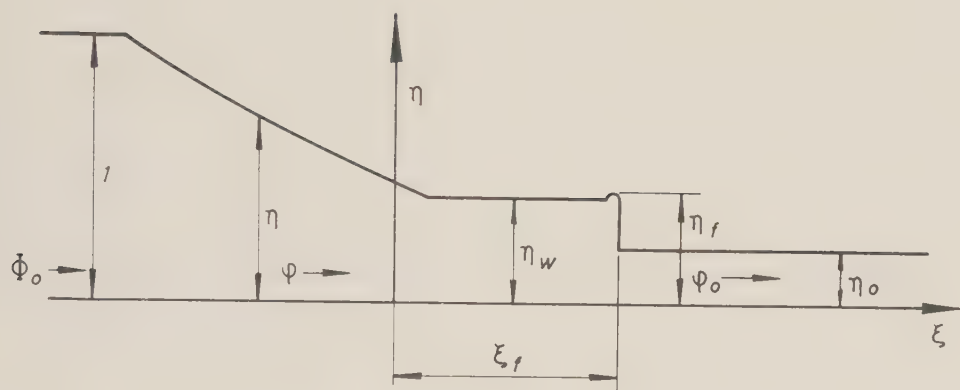
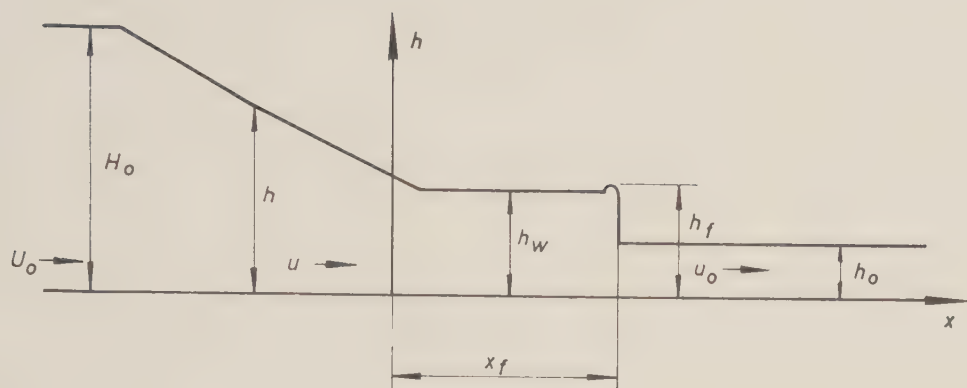
H_0	Profondeur initiale en amont de la vanne.
h_0	Profondeur initiale en aval de la vanne.
h	Profondeur courante dans l'écoulement.
h_w	Profondeur du corps de l'onde positive aval.
h_f	Profondeur maximale obtenue en aval de la vanne.
h^*	Surélévation maximale d'onde secondaire.
e	Longueur d'onde secondaire.
x	Abscisse comptée dans le sens de l'écoulement à partir de la vanne.
x_r	Abscisse du front de l'onde négative amont.
x_f	Abscisse du front de l'onde positive aval.
t	Temps compté à partir du début de la disparition de la vanne.
U_0	Vitesse moyenne spatiale initiale de l'écoulement en amont de la vanne.
u_0	Vitesse moyenne spatiale initiale de l'écoulement en aval de la vanne.
u	Vitesse moyenne spatiale en une section transversale quelconque.
v	$v = \sqrt{gh}$.
w_r	Célérité de l'onde négative amont $w_r = \frac{x_r}{t}$.
w_f	Célérité de l'onde positive aval $w_f = \frac{x_f}{t}$.

GRANDEURS ADIMENSIONNELLES

η_0	Profondeur initiale aval $\eta_0 = \frac{h_0}{H_0}$.
η	Profondeur relative courante $\eta = \frac{h}{H_0}$.
η_w	Profondeur du corps de l'onde en aval de la vanne $\eta_w = \frac{h_w}{H_0}$.
η_f	Profondeur maximale obtenue en aval de la vanne $\eta_f = \frac{h_f}{H_0}$.
ξ	Abscisse relative $\xi = \frac{x}{H_0}$.

ξ_r	Abscisse relative du front de l'onde négative amont $\xi_r = \frac{x_r}{H_0}$.
ξ_f	Abscisse relative du front de l'onde positive aval $\xi_f = \frac{x_f}{H_0}$.
τ	Temps relatif $\tau = t \sqrt{\frac{g}{H_0}}$.
Φ_0	Vitesse relative initiale amont $\Phi_0 = \frac{U_0}{\sqrt{gH_0}}$.
φ_0	Vitesse relative initiale aval $\varphi_0 = \frac{u_0}{\sqrt{gH_0}}$.
φ	Vitesse relative courante $\varphi = \frac{u}{\sqrt{gH_0}}$.
ψ_f	Célérité relative du front de l'onde positive aval $\psi_f = \frac{\xi_f}{\tau}$.
$\mathcal{R}$	Nombre de Reynolds $\mathcal{R} = \frac{u \mathcal{R}_H}{\nu}$.
$\mathcal{F}$	Nombre de Froude $\mathcal{F} = \frac{u}{\sqrt{gh}}$.
i	Pente du radier comptée positivement si le radier s'abaisse dans le sens de l'écoulement.
λ	Coefficient de perte de charge $\lambda = \frac{4 \Delta H \cdot \mathcal{R}_H}{u^2 \cdot L}$;

($\mathcal{R}_H$ est le rayon hydraulique, L la longueur sur laquelle se produit la perte de charge ΔH).



ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

La bibliographie relative au type particulier d'écoulement non permanent envisagé dans cette contribution n'est pas très abondante.

En fait, beaucoup de chercheurs se sont attachés à l'étude des mouvements graduellement variables, caractérisés par des évolutions lentes dans l'espace et le temps et les auteurs étudiant la théorie des écoulements rapidement variables, tels que ceux qui nous intéressent, l'envisagent, en général, comme une extension de celle des écoulements graduellement variables.

On considère dans ce qui suit successivement :

- la théorie générale des écoulements graduellement variables et les méthodes d'intégration possibles;
- l'application de cette théorie aux écoulements consécutifs à l'établissement brusque d'un débit sur fond initialement sec;
- l'influence d'un tirant d'eau initial;
- les diverses expérimentations et la comparaison de leurs résultats avec ceux résultant des calculs théoriques;
- les problèmes non encore résolus.

1,1

THÉORIE GÉNÉRALE DES ÉCOULEMENTS GRADUELLEMENT VARIABLES

L'étude théorique des écoulements variables à surface libre se heurtant, dans le cas le plus général, à des difficultés insurmontables, il est nécessaire de définir un schéma d'écoulement accessible au calcul. On introduit ainsi la notion d'écoulement graduellement variable.

Les hypothèses contenues dans ce schéma sont :

- absence de discontinuité tant sur les caractéristiques géométriques longitudinales du lit que sur la profondeur de l'eau;
- évolution longitudinale suffisamment progressive pour rendre négligeables les forces d'inerties relatives aux déplacements verticaux et transversaux;
- répartition des vitesses uniforme dans chaque section.

Partant de ces hypothèses, BARRÉ DE SAINT-VENANT, en 1871 [1], a appliqué l'équation de continuité et l'équation des quantités de mouvement en projection horizontale, établissant les équations qui portent son nom :

$$(1) \quad \begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(S \cdot u) &= 0, \\ g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} &= g \left(i - F \frac{x}{S} \right), \end{aligned}$$

(S désigne la section transversale et F la force de frottement).

Si les forces de frottement sont compensées par l'accélération due à la pente et si le canal est prismatique de section rectangulaire, les équations de SAINT-VENANT deviennent :

$$(2) \quad \begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(h \cdot u) &= 0, \\ g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} &= 0 \end{aligned}$$

et les solutions s'écrivent :

$$(3) \quad \begin{aligned} u &= 2\sqrt{gH_0} - 2\sqrt{gh}, \\ x &= (2\sqrt{gH_0} - 3\sqrt{gh}) t. \end{aligned}$$

Il s'agit d'un cas trop restrictif pour que la solution ci-dessus soit applicable à la plupart des problèmes réels. Aussi les efforts des chercheurs qui ont suivi BARRÉ DE SAINT-VENANT ont-ils essentiellement porté sur les méthodes d'intégration nécessitant des hypothèses moins restrictives. On peut citer à cet égard les études effectuées par DEYMIÉ [2] et MASSÉ [3] en 1935 et 1936, qui supposent des variations de profondeur de faible amplitude. Cette hypothèse, valable dans un certain nombre de cas particuliers, est inacceptable dans l'étude des écoulements qui nous intéressent.

Les méthodes d'intégration du cas général [éq. (1)] sont soit analytiques, soit numériques ou graphiques. Analytiques, elles reposent sur l'application de la méthode des caractéristiques; par voie numérique ou graphique, on peut opérer ou bien par la méthode de caractéristiques ou bien directement par une méthode de différences finies.

Nous allons envisager au paragraphe suivant l'application de ces différentes méthodes à l'intégration des équations de SAINT-VENANT dans le cas qui nous intéresse.

1,2 APPLICATIONS DE LA THÉORIE DES ÉCOULEMENTS GRADUELLEMENT VARIABLES AUX ÉCOULEMENTS ACCOMPAGNANT LA VIDANGE D'UNE RETENUE

Soit un lit coupé par une vanne en amont de laquelle existe une retenue d'eau. On suppose qu'instantanément la vanne disparaît, libérant la retenue.

En dépit du caractère brusque de l'écoulement ainsi créé — et sur lequel on reviendra ultérieurement — on admet que l'écoulement obéit aux équations de SAINT-VENANT, et par-là même se trouve conforme aux hypothèses définissant un écoulement

graduellement variable. Il s'en suit, entre autres restrictions, l'absence de tirant d'eau initial à l'aval de la vanne.

Les méthodes analytiques nécessitant d'admettre que le lit soit prismatique de section rectangulaire, on séparera ce paragraphe en deux parties.

1,21 Intégration analytique.

Toutes ces hypothèses admises, BARRÉ DE SAINT-VENANT a donné la solution citée plus haut, valable lorsque, de plus, la pente équilibre le frottement [éq. (3)].

On rappelle à cette occasion que RITTER [4] a également trouvé ces solutions, en décomposant en petits éléments la retenue et en leur appliquant les équations fondamentales.

Cette solution particulière peut également se mettre sous la forme :

$$\begin{aligned} \sqrt{gh} &= \frac{1}{3} \left(2 \sqrt{gH_0} - \frac{x}{t} \right), \\ u &= \frac{2}{3} \left(\frac{x}{t} + \sqrt{gH_0} \right). \end{aligned}$$

Déjà cette solution donne une représentation approximative de l'écoulement. La ligne d'eau apparaît comme une parabole tangente au radier à l'aval de la vanne et tournant sa concavité vers le haut. Cette parabole pivote au cours du temps autour d'un point fixe placé dans la section de la vanne, point fixe limitant la profondeur critique. La section de la vanne partage donc l'écoulement en deux régions : à l'amont, l'écoulement est subcritique, à l'aval, il est supercritique. Mais on voit immédiatement apparaître une anomalie : il est physiquement évident que le frottement, s'il n'était équilibré par la pente (l'hypothèse est d'ailleurs inacceptable tout le long de l'écoulement), déformerait le front aval, la ligne d'eau cessant d'être tangente au radier.

Si on introduit la notation $v = \sqrt{gh}$ dans les équations de SAINT-VENANT, on obtient :

$$\begin{aligned} (4) \quad & 2 \frac{\partial v}{\partial t} + 2u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \\ & \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + 2v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\lambda}{8} \left(\frac{u}{v} \right)^2 = 0. \end{aligned}$$

En 1952, R. F. DRESSLER [5] a cherché l'intégration analytique dans le cas d'un canal prismatique de section rectangulaire sans pente.

Introduisant les grandeurs sans dimensions suivantes :

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{x}{H_0}, & \tau &= t \frac{g}{\sqrt{gH_0}}, & \eta &= \frac{h}{H_0}, \\ \varphi &= \frac{u}{\sqrt{gH_0}}, & \omega &= \frac{v}{\sqrt{gH_0}}, & \lambda &, \end{aligned}$$

les équations de SAINT-VENANT deviennent :

$$(5) \quad \begin{aligned} \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} + \varphi \frac{\partial \varphi}{\partial \xi} + 2 \omega \frac{\partial \omega}{\partial \xi} + \lambda \left(\frac{\varphi}{\omega} \right)^2 &= 0, \\ \omega \frac{\partial \varphi}{\partial \xi} + 2 \frac{\partial \omega}{\partial \tau} + 2 \varphi \frac{\partial \omega}{\partial \xi} &= 0, \end{aligned}$$

qui, après addition membre à membre, s'écrivent :

$$(6) \quad \begin{aligned} \left[\frac{\partial \varphi}{\partial \tau} + 2 \frac{\partial \omega}{\partial \tau} \right] + (\varphi + \omega) \left[\frac{\partial \varphi}{\partial \xi} + 2 \frac{\partial \omega}{\partial \xi} \right] + \lambda \left(\frac{\varphi}{\omega} \right)^2 &= 0, \\ \left[\frac{\partial \varphi}{\partial \tau} - 2 \frac{\partial \omega}{\partial \tau} \right] + (\varphi - \omega) \left[\frac{\partial \varphi}{\partial \xi} - 2 \frac{\partial \omega}{\partial \xi} \right] + \lambda \left(\frac{\varphi}{\omega} \right)^2 &= 0. \end{aligned}$$

Il s'agit d'équations aux dérivées partielles du premier ordre, dont les équations caractéristiques sont :

$$(7) \quad \begin{aligned} \text{I-} \frac{d \xi}{d \tau} &= \varphi + \omega & \text{II-} d(\varphi + 2 \omega) &= -\lambda \left(\frac{\varphi}{\omega} \right)^2 d \tau, \\ \text{I+} \frac{d \xi}{d \tau} &= \varphi - \omega & \text{II+} d(\varphi - 2 \omega) &= -\lambda \left(\frac{\varphi}{\omega} \right)^2 d \tau. \end{aligned}$$

Tout le problème revient à l'intégration des équations caractéristiques.

DRESSLER n'a pu aboutir à une solution rigoureuse du problème. Il a dû introduire un développement en série de φ et de ω dont le premier terme correspond à la solution que nous appellerons solution de RITTER [éq. (3)] et dont les autres termes, limités à un seul, apportent la correction due à l'influence du frottement. Ce développement en série perd sa validité loin à l'aval de la vanne; en particulier, les lignes d'eau présentant un minimum de profondeur physiquement impossible que l'auteur raccorde au front par des considérations purement physiques. Cette solution apporte toutefois des résultats théoriques intéressants sur la plus grande partie de l'écoulement, notamment au voisinage de la section de la vanne. On constate, en particulier, comment se déplace vers l'aval, au cours du temps, la section critique qui, en l'absence de frottement, reste fixe.

En 1953, WHITHAM [6] a repris le problème sur une base différente. Au lieu d'envisager l'influence du frottement sur l'ensemble de l'écoulement, il en localise les effets dans la région frontale et considère tout le reste de l'écoulement comme obéissant à la solution de RITTER. Cette façon d'envisager le problème se justifie par le rôle modeste du frottement dans des régions où les vitesses ne sont pas considérables.

Les équations nécessaires sont obtenues en appliquant à la région frontale, considérée comme un tout, la loi de conservation de la masse et le théorème des quantités de mouvements.

Les applications numériques faites par DRESSLER [7] en 1954, montrent une bonne concordance entre ses propres résultats théoriques et ceux de WHITHAM.

En 1958, DRESSLER [8] a étudié le problème dans le cas du canal prismatique de section rectangulaire avec pente, mais sans frottement.

En utilisant des axes de coordonnées se déplaçant avec une accélération tenant compte de la pente, il a obtenu une solution rigoureuse au problème, mais l'impossibilité d'associer simultanément pente et frottement ôte de l'intérêt à cette méthode.

On constate que, indépendamment des hypothèses restrictives qui entrent dans l'établissement des équations de SAINT-VENANT, l'intégration analytique de ces dernières nécessite des simplifications supplémentaires importantes, de sorte qu'il n'est guère possible, par ces méthodes, de connaître plus que l'allure du phénomène, sauf dans les quelques cas particuliers compatibles avec ces simplifications.

De là vient l'intérêt des méthodes d'intégration numériques ou graphiques.

1,22 **Intégration numérique ou graphique.**

Il s'agit de méthodes dans lesquelles on construit, point par point, les fonctions-solutions en déterminant chaque point à partir du précédent par introduction dans les équations différentielles d'éléments finis.

Bien que dans cette optique, il soit possible de travailler directement sur les équations de SAINT-VENANT, il semble préférable de faire le calcul sur les équations caractéristiques. Les phénomènes de mouvements variables peuvent être considérés comme la superposition d'ondes de translation infiniment petites. Les courbes caractéristiques traduisent en chacun de leur point le lieu et l'état des fronts des ondes élémentaires. Il est particulièrement agréable de suivre au cours d'un calcul le développement physique du phénomène.

Déjà, à la suite de ses études relatives aux coups de bélier en conduites, BERGERON avait fait l'application de sa méthode aux écoulements variables à surface libre. Mais le choix des variables et les hypothèses relatives aux célérités limitent le domaine d'application de cette méthode aux écoulements de faibles vitesse et amplitude.

Aux environs de 1942, M. RÉMÉNIÉRAS a étendu le domaine d'application des méthodes graphiques.

En 1945, M. le Professeur CRAYA [9] a publié un article dans lequel il développe une méthode graphique d'application générale aux écoulements graduellement variables. Dans son exposé, l'auteur établit les équations qui régissent le mouvement en appliquant directement les théorèmes fondamentaux à une onde élémentaire, puis à la rencontre de deux ondes élémentaires. Enfin, il généralise à la rencontre de deux trains d'ondes superposées, envisageant ainsi le cas général. En fait, les équations auxquelles il aboutit directement sont les équations caractéristiques des équations de SAINT-VENANT; la méthode ainsi développée n'est autre qu'une méthode d'intégration graphique de ces équations.

Cette théorie admet par conséquent les mêmes hypothèses que celles entrant dans l'établissement des équations de SAINT-VENANT, mais n'en nécessite en principe aucune supplémentaire. Toutefois, le calcul graphique exécuté conformément à cette méthode

est très laborieux dans le cas le plus général. Aussi est-ce plutôt par voie numérique, grâce à l'utilisation de calculatrices, qu'il convient de traiter les problèmes les plus complexes.

Le Centre de Recherches et d'Essais de Chatou a étudié le problème par voie numérique. Les méthodes qui y sont appliquées permettent, notamment, l'introduction des hypothèses supplémentaires nécessaires à la résolution du problème de propagation sur fond sec [10].

1.23 Étude théorique de l'écoulement au voisinage immédiat de la section de vidange brusque d'une retenue.

Bien que le mouvement de l'eau, immédiatement après l'ouverture de la vanne, intervienne peu dans l'évolution ultérieure du phénomène, il présente un intérêt en tant qu'écoulement non permanent à deux dimensions, c'est-à-dire non régi par les équations de SAINT-VENANT.

C'est en 1950 que POHLE [11] a étudié ce mouvement en se basant sur les équations d'un écoulement de fluide parfait à deux dimensions, écrites en coordonnées de Lagrange. Cette théorie montre que la ligne d'eau présente un angle vif dont l'origine se trouve à l'intersection de la surface de retenue et de la vanne. Cet angle vif se déplace vers le bas suivant une trajectoire verticale et avec l'accélération de la pesanteur. Une expérimentation conduite par DRESSLER [7] confirme l'allure du phénomène tout en montrant des écarts de trajectoire probablement imputables aux effets de tension superficielle. Ajoutons que ces équations, plus complexes que celles de SAINT-VENANT, ne se prêtent pas actuellement à la résolution du problème de l'ensemble de l'écoulement.

1.3 ÉCOULEMENTS ACCOMPAGNANT LA VIDANGE BRUSQUE D'UNE RETENUE EN PRÉSENCE D'UN TIRANT D'EAU INITIAL AVAL

Dans tout ce qui précède, on envisage l'application de la théorie des écoulements graduellement variables. Cette théorie suppose, rappelons-le, l'absence de toute discontinuité y compris sur la profondeur de l'eau. Elle ne permet pas, *a priori*, de traiter un écoulement variable présentant un front d'onde d'amplitude finie. On a déjà rencontré un front d'amplitude finie à l'aval de l'écoulement, mais il s'agissait de la limite d'un écoulement et non d'un front de propagation d'onde.

S'il existe un tirant d'eau initial à l'aval de la vanne, l'écoulement créé par la disparition de cette vanne est régi à la fois par les conditions de propagation d'ondes infiniment petites et par les conditions de propagation d'une onde finie descendant sur le tirant d'eau aval.

On a alors affaire à un écoulement répondant à la définition des écoulements graduellement variables, limité à un front raide de propagation aval d'amplitude finie. La formation de ce front raide peut se déterminer à partir de la théorie du ressaut, mais son évolution dépend de celle de la région qui le précède.

Il reste possible de déterminer l'évolution du front raide dans le cadre des écoulements graduellement variables, en envisageant la propagation d'ondes élémentaires sur le corps de l'onde finie. Les états successifs de ces ondes élémentaires au niveau du front définissent l'état du front lui-même.

Il n'est possible de traiter cette configuration que par voie numérique ou graphique.

En 1945, RÉ [12] a appliqué dans ces conditions la méthode graphique établie par M. le Professeur CRAYA. Dans cette application, il a effectué des approximations rendant pratiquement possible le mode opératoire de l'épure.

1,4

EXPÉRIMENTATION

Les écoulements variables ont donné lieu à de nombreuses expérimentations. Elles concernent, soit la propagation des fronts raides, soit les écoulements graduellement variables et, plus spécialement, ceux qui accompagnent la vidange brusque d'une retenue avec ou sans tirant d'eau initial aval.

1,41 Propagation de fronts raides.

Dès 1860, BAZIN a expérimenté dans une rigole parallèle à l'un des biefs du canal de Bourgogne; le long de cette rigole de 200 m de longueur, quatre observateurs notaient la hauteur de l'onde qui passait devant eux, en même temps qu'un cinquième en déterminait la vitesse.

C'est en 1933 que FAVRE [13] a étudié, avec des moyens techniques perfectionnés, les propagations des ondes de translation. Opérant dans un canal de profil rectangulaire de 74 m de longueur et de 0,42 m de largeur, FAVRE a enregistré les hauteurs des corps d'ondes grâce à des pots de mesure en communication avec le canal. La région voisine du front de l'onde, à évolution trop rapide pour être analysée par ce procédé, a été observée grâce à une méthode photogrammétrique. A cet effet, des confetti de couleur noire, posés sur la surface, constituaient les objets photographiables.

Parmi les résultats les plus intéressants obtenus par FAVRE, il faut remarquer les observations relatives à la région frontale de l'onde : le front est suivi d'une série d'ondulations dont amplitude et longueur d'onde sont fonctions du rapport existant entre l'amplitude moyenne de l'onde et la profondeur sur laquelle elle se propage. C'est à ces ondulations que l'on donne le nom d'ondes de FAVRE.

1,42 Écoulements accompagnant la vidange brusque d'une retenue.

Dans un article, SCHOKLITSCH [14] fait état d'essais conduits, en l'absence de tirant d'eau initial aval, par ZEITLINGER en 1914, au cours desquels cet auteur a effacé vers le haut, aussi vite que possible, une vanne. Les résultats obtenus correspondent bien à l'équation de RITTER, sauf la région frontale, influencée par le frottement. SCHOKLITSCH,

lui-même, a effectué sur fond sec, en aval, un certain nombre d'essais avec suppression totale ou partielle d'une vanne.

Ces essais lui ont permis de déterminer le tirant d'eau dans la section de la vanne en fonction de la largeur relative de l'ouverture. Dans le cas de la suppression totale, SCHOKLITSCH trouve, au droit de la vanne, des valeurs de profondeur et de débit très voisines de celles de RITTER. En outre, il obtient des lignes d'eau qui ressemblent beaucoup à celles de son prédécesseur, mais ces mesures ne sont accompagnées d'aucun renseignement concernant les pertes de charge du canal. Des essais effectués avec tirant d'eau initial aval permettent des observations confirmées et détaillées par FAVRE.

On peut citer également les expériences conduites entre 1931 et 1935 par EGUIAZAROFF, qui conduisent à des conclusions analogues à celles tirées des travaux de SCHOKLITSCH.

C'est, en 1952, que L. LÉVIN [15] a effectué un grand nombre d'expériences en vue de déterminer l'état de l'écoulement dans la période qui suit immédiatement la suppression de la vanne. Ces renseignements lui sont nécessaires à l'établissement d'une méthode graphique de calcul.

Dans le but de vérifier les résultats donnés par sa théorie et par celle de WHITHAM, DRESSLER fait faire une expérimentation dont les résultats sont publiés en 1954 [7]. Il opère dans un canal ayant 65 m de longueur et 22,5 cm de largeur, toujours sans tirant d'eau initial à l'aval et avec trois natures de fond différentes. Les mesures sont effectuées par voie cinématographique; tous les résultats concernent les lignes d'eau et confirment avec plus de précision les observations antérieures. On constate que le début de l'écoulement ne respecte pas les solutions de l'équation de SAINT-VENANT en raison de la rapidité de l'évolution. La comparaison de ses résultats avec les valeurs calculées, tant par sa théorie que par celle de WHITHAM, montrent un écart. L'auteur l'attribue au fait que le coefficient de perte de charge, déterminé en écoulement permanent et introduit dans les solutions théoriques, n'est pas valable. Peut-être faut-il également remarquer que le long de l'écoulement variable, le coefficient de perte de charge ne peut être constant en raison des variations du nombre de Reynolds et de la rugosité relative.

Il faut enfin citer les expériences de N. M. VOLKOFF [16], publiées en 1956. Ces essais portent essentiellement sur la période qui suit immédiatement l'établissement brusque du débit et sont conduits sans tirant d'eau initial à l'aval. VOLKOFF a fait varier le rapport des largeurs amont-aval du canal ainsi que la largeur relative de l'ouverture. Ces expériences lui ont permis de déterminer le coefficient de débit de l'ouverture.

1,5

PROBLÈMES NON RÉSOLUS

Dans la mesure où l'écoulement qui accompagne la vidange brusque d'une retenue peut être considéré comme graduellement variable, il est régi par les équations de SAINT-VENANT. On a vu qu'il était possible de trouver à ces équations une solution sans hypothèse supplémentaire en opérant par voie graphique ou numérique. Seule, dans ce cas, doit être considérée la validité des hypothèses introduites par SAINT-VENANT dans le cas des écoulements rapidement variables. A cet égard, les expérimentations

citées ci-dessus montrent que ces hypothèses sont valables si l'on fait abstraction de la toute première phase de l'écoulement.

Au contraire, les cas dans lesquels existent des discontinuités n'ont pas reçu de solution théorique rigoureuse. Ce sont ceux dans lesquels le lit présente des variations brusques de largeur ou de pente. De même, si les configurations présentant un front d'onde finie peuvent être traités par le calcul, ce calcul n'a pas reçu de confirmation expérimentale.

En dehors de la recherche de l'écoulement d'ensemble, il y a lieu de se préoccuper de phénomènes locaux et passagers dont l'importance relative peut être considérable : ondes secondaires de FAVRE, surélévation locale à l'aval proche de la vanne.

Parmi ces problèmes, nous nous attachons à l'étude de l'écoulement en canal prismatique de section rectangulaire et de pente nulle en étudiant l'influence du tirant d'eau initial aval, tant sur l'écoulement d'ensemble que sur les phénomènes locaux susceptibles de se superposer à lui.

CHAPITRE II

2 THÉORIE SANS PERTE DE CHARGE NI PENTE EN CANAL PRISMATIQUE DE SECTION RECTANGULAIRE

2,1 ÉCOULEMENT SUR FOND INITIALEMENT SEC

On considère ces écoulements comme graduellement variables, négligeant ainsi les accélérations verticales. Ils sont donc régis par les équations de SAINT-VENANT, simplifiées par suppression des termes pente et frottement :

$$(1) \quad \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + 2\sqrt{gh} \frac{\partial \sqrt{gh}}{\partial x} = 0,$$

$$(2) \quad \sqrt{gh} \frac{\partial u}{\partial x} + 2 \left(\frac{\partial \sqrt{gh}}{\partial t} + u \frac{\partial \sqrt{gh}}{\partial x} \right) = 0.$$

Les équations caractéristiques de ce système d'équations s'écrivent :

$$(3) \quad I_+ \frac{dx}{dt} = u - \sqrt{gh};$$

$$(4) \quad I_- \frac{dx}{dt} = u + \sqrt{gh};$$

$$(5) \quad II_+ d(u - 2\sqrt{gh}) = 0;$$

$$(6) \quad II_- d(u + 2\sqrt{gh}) = 0.$$

L'intégration de ces équations conduit à la correspondance entre x et t , d'une part, et u et h , d'autre part. Elle est possible analytiquement dans ce cas particulier, mais il est intéressant de l'envisager graphiquement ainsi que l'a fait M. le Professeur CRAYA, car ce sera utile au paragraphe suivant.

Le déroulement schématique de l'écoulement est le suivant :

Imaginons d'abord que la vanne qui limite la retenue se déplace vers l'aval suivant un mouvement de translation accélérée que l'on décompose en une succession de parcours à vitesse constante.

Lors de son premier parcours, elle se déplace de Δx à une vitesse u_1 , provoquant l'émission d'une onde de translation montante négative dont l'amplitude $H_0 - h_1$ est définie par l'équation (6) :

$$u_1 + 2\sqrt{gh_1} = C^{\text{te}} = 2\sqrt{gH_0}$$

et dont la célérité est égale à $\sqrt{gH_0}$ (voir *fig. 1*).

Un deuxième parcours de la vanne à vitesse $u_2 > u_1$ provoque la formation d'une onde d'amplitude $h_2 - h_1$ satisfaisant encore à l'équation (6); sa célérité est égale à $\sqrt{gh_1}$.

Si la vanne poursuit ainsi sa progression, elle atteint une vitesse limite u_n , à laquelle est associée une profondeur amont $h_n = 0$ et : $u_n = 2\sqrt{gH_0}$.

Si l'on suit le même raisonnement, mais en supposant que le mouvement de la vanne se déroule en un temps infiniment petit, toutes les ondes successives se forment simultanément. L'écoulement est alors décrit par les *figures 1* et *2*. Sur la *figure 2* apparaissent les lieux des fronts d'ondes dans le plan (x, t) .

On voit apparaître deux régions d'écoulement séparées par la section de la vanne : la région amont dans laquelle remontent les ondes émises, la région aval où la vitesse u d'écoulement est supérieure à la célérité des ondes et où, par suite, les fronts d'ondes ont une vitesse absolue orientée vers l'aval. En d'autres termes, la région amont est siège d'un écoulement subcritique caractérisé par un nombre de Froude inférieur à l'unité; dans la région aval, le nombre de Froude est supérieur à l'unité et l'écoulement est supercritique.

Les solutions de cet écoulement ont déjà été trouvées par RITTER et ont la forme :

$$(7) \quad u = \frac{2}{3} \left(\frac{x}{t} + \sqrt{gH_0} \right);$$

$$(8) \quad \sqrt{gh} = \frac{1}{3} \left(2\sqrt{gH_0} - \frac{x}{t} \right).$$

L'équation (7) donne la répartition longitudinale des vitesses, l'équation (8) la forme de la ligne d'eau.

On observe que :

$u \left(\frac{x}{t} \right)$ est représentée par une droite ainsi que chaque répartition instantanée des vitesses;

$u(t)$ à x donné est représentée par une hyperbole;

$h \left(\frac{x}{t} \right)$ est représentée par une parabole tangente au fond sec ainsi que chaque ligne d'eau instantanée.

De plus, la section de la vanne est une section critique séparant le régime fluvial amont du régime torrentiel aval.

Enfin, la célérité du front de l'onde négative amont est égale à $-\sqrt{gH_0}$ et celle du front de l'onde positive aval est égale à $2\sqrt{gH_0}$. Il faut d'ailleurs préciser que

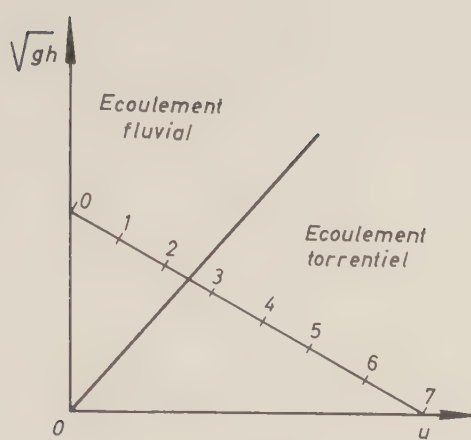


Fig. 1

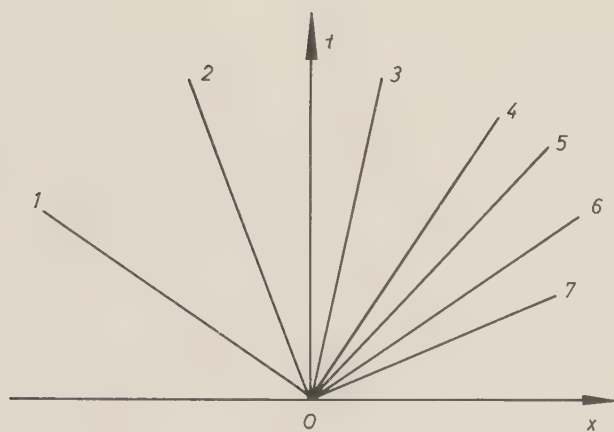


Fig. 2

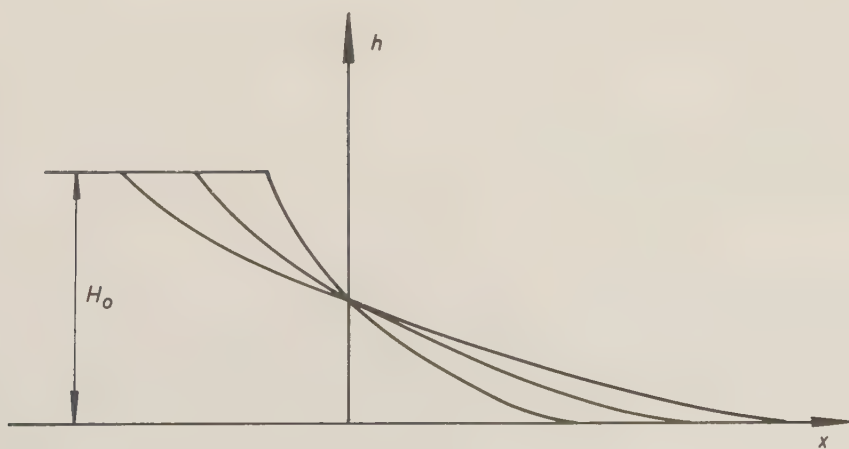


Fig. 3

l'appellation front d'onde positive doit être prise ici dans un sens large, car il s'agit non d'un front de propagation, mais de la limite de l'écoulement.

L'allure de l'écoulement ainsi obtenu est montrée sur les figures 3 et 4.

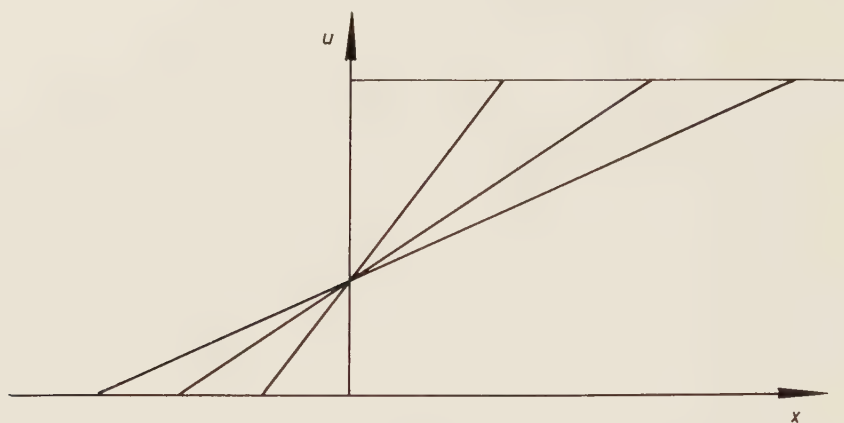


Fig. 4

Introduisons les coordonnées sans dimension déjà adoptées par R. F. DRESSLER :

$$\xi = \frac{x}{H_0}, \quad \eta = \frac{h}{H_0}, \quad \tau = t \sqrt{\frac{g}{H_0}}, \quad \varphi = \frac{u}{\sqrt{gH_0}}.$$

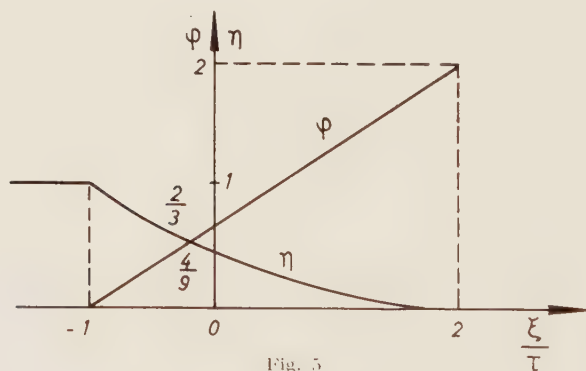


Fig. 5

La solution de RITTER prend la forme :

$$\varphi = \frac{2}{3} \left(\frac{\xi}{\tau} + 1 \right) \quad \text{et} \quad \eta = \frac{1}{3} \left(2 - \frac{\xi}{\tau} \right).$$

De plus, l'utilisation de la variable $\frac{\xi}{\tau}$, comme l'aurait fait d'ailleurs l'usage de $\frac{x}{t}$, abouti à « figer » les résultats, à les rendre indépendants du temps. C'est la constance dans le temps de la célérité locale $\sqrt{gh}$ qui apporte cette simplification.

L'écoulement peut se représenter ainsi (fig. 5 et 6).

En désignant par ξ_f l'abscisse relative du front de l'onde positive, on a pour sa célérité $\psi = \frac{\xi_f}{\tau}$. Cette célérité a pour valeur 2 dans le cas particulier.

La théorie des écoulements graduellement variables apporte une solution simple dans le cas du canal sans pente ni perte de charge avec fond sec en aval du barrage.

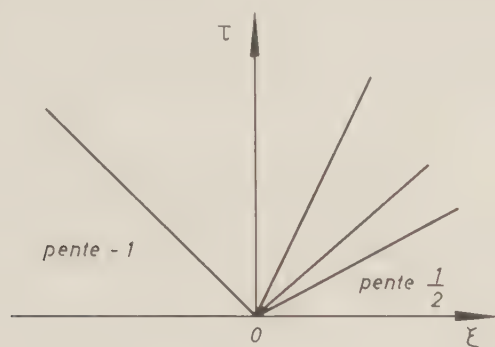


Fig. 6

2.2

ÉCOULEMENTS SUR TIRANT D'EAU INITIAL

Ces écoulements ne répondent plus à la définition des écoulements graduellement variables. En effet, ils comportent la propagation d'une onde d'amplitude finie vers l'aval. Toutefois, on peut les considérer comme la juxtaposition d'un écoulement graduellement variable et d'une onde de choc.

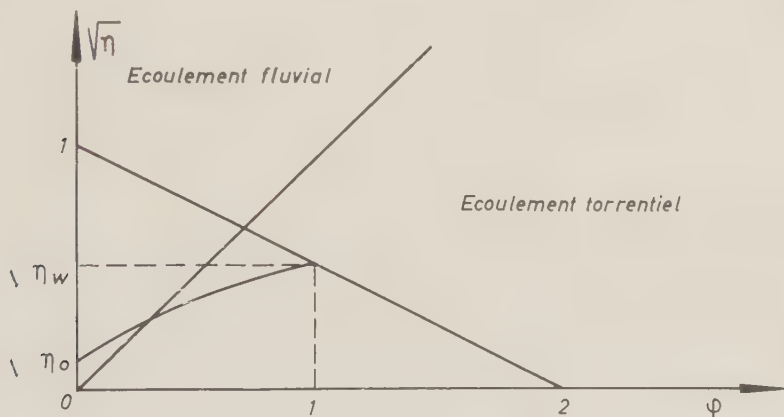


Fig. 7

Reportons-nous aux figures 1 et 2 représentant graphiquement les caractéristiques des ondes élémentaires constituant l'écoulement sur fond sec. Nous n'avons envisagé que la propagation, vers l'amont, d'ondes élémentaires négatives qui se formaient jusqu'à obtention d'une profondeur nulle. Les seules conditions de propagation à considérer ne concernaient que les ondes montantes. Maintenant, il existe initialement une certaine profondeur d'eau en aval au repos. Il faut écrire que l'écoulement respecte à la fois les lois

de propagation des ondes négatives montantes et d'une onde positive descendante d'amplitude finie. Cette dernière n'a pas, au sens mathématique du terme, de courbe caractéristique puisqu'elle ne rentre pas dans le cadre des équations (1) et (2). Toutefois, les plans $(u, \sqrt{gh})$ et (x, t) permettent de représenter les relations auxquelles doit satisfaire l'onde positive finie.

Ces relations, qui s'appliquent également au ressaut stationnaire, s'écrivent :

$$(9) \quad w_f = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{gh_w}{gh_0}} (gh_w + gh_0);$$

$$(10) \quad u_w = (gh_w - gh_0) \sqrt{\frac{1}{2} \frac{gh_w + gh_0}{gh_w gh_0}}.$$

La profondeur h_w et la vitesse d'écoulement u_w dans le corps de l'onde positive aval sont solution des équations :

$$(11) \quad u_w + 2 \sqrt{gh_w} = 2 \sqrt{gH_0}$$

pour satisfaire à la condition de propagation vers l'amont des ondes élémentaires montantes et de l'équation (10) pour satisfaire à la condition de propagation vers l'aval de l'onde finie descendante.

De la connaissance de h_w s'ensuit celle de w_f , célérité du front positif aval.

Avec les notations sans dimensions déjà introduites en 2,1 auxquelles s'ajoutent $\eta_0 = \frac{h_0}{H_0}$, les relations (9), (10) et (11) deviennent :

$$(12) \quad \psi_f = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{\eta_w}{\eta_0}} (\eta_w + \eta_0);$$

$$(13) \quad \varphi_w = (\eta_w - \eta_0) \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\eta_w + \eta_0}{\eta_w \eta_0}};$$

$$(14) \quad \varphi_w + 2 \sqrt{\eta_w} = 2,$$

η_0 , rapport de la profondeur initiale aval à la profondeur initiale amont, représente le paramètre de la valeur duquel dépend l'ensemble de l'écoulement.

La solution du système d'équations (13), (14) peut se trouver graphiquement dans le plan $(\varphi, \sqrt{\eta_w})$ équivalent du plan $(u, \sqrt{gh})$ déjà envisagé.

La courbe $\eta_w = f(\eta_0)$ est représentée sur la planche 1, accompagnée de points expérimentaux sur lesquels on reviendra au chapitre III, paragraphe 3,81.

Les planches 2 et 3 montrent les courbes φ_w et ψ_f en fonction de η_0 .

La planche 3 présente une particularité. On constate, en effet, que la variation de ψ_f en fonction de η_0 , très rapide pour les petites valeurs de η_0 , est faible en dehors de ce domaine. Compte tenu du fait que les pertes de charge diminuent beaucoup ψ_f pour les très petites valeurs de η_0 , ce qui apparaîtra au chapitre III, on peut dire que la célérité du front positif aval est pratiquement indépendante de la profondeur initiale aval.

On constate sur la *figure 7* que suivant la valeur de η_0 , la valeur de η_w peut être soit inférieure, soit supérieure à 1, autrement dit que l'écoulement dans le corps de l'onde

positive aval peut être supercritique ou subcritique. Dans le premier cas, l'écoulement est successivement subcritique en amont de la vanne, puis supercritique jusqu'au front aval; dans le deuxième cas, il est entièrement subcritique.

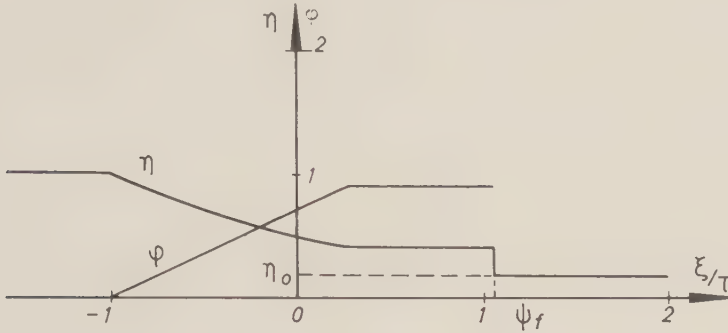


Fig. 8

Dans les plans $(\xi/\tau, \eta \text{ ou } \varphi)$ et (ξ, τ) l'écoulement prend la forme indiquée sur les figures 8 et 9.

La théorie exposée ci-dessus est évidemment très schématique puisque ne prenant pas en compte les pertes de charge; elle est impuissante à faire l'analyse fine de

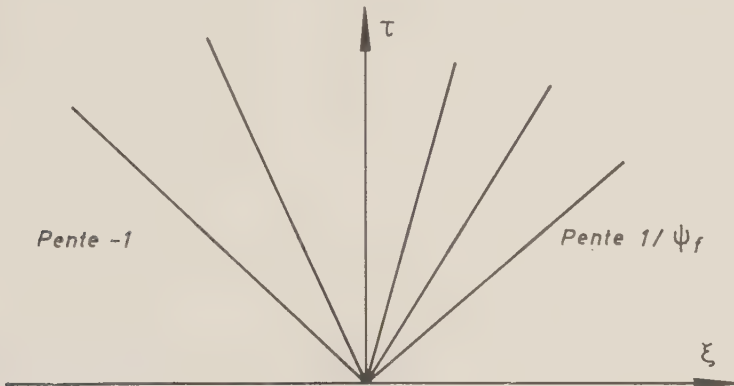


Fig. 9

l'écoulement, laissant de côté les phénomènes auxiliaires tels que les ondulations secondaires.

Elle permet de caractériser l'ensemble de l'écoulement et au chapitre suivant, on verra que la comparaison entre les résultats expérimentaux et théoriques est assez fructueuse.

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

PROGRAMME

L'étude expérimentale est effectuée dans un canal vitré de section rectangulaire.

Une vanne à levée verticale rapide est placée au milieu du canal.

Les paramètres dont on étudie l'influence sont les suivants : H_0 , h_0 , ϵ .

Dans ces paramètres, ϵ désigne le type de rugosité qui influe sur le coefficient de perte de charge λ .

Les essais sont décomposés en séries caractérisées par ϵ , chaque série comportant comme paramètres réglables H_0 , h_0 .

Les variations de ϵ sont obtenues par changement de la rugosité du fond du canal.

Il est envisagé deux rugosités différentes.

DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

3,21 Canal d'essais.

Le canal d'essais a pour caractéristiques géométriques :

- longueur totale : 40 m;
- largeur intérieure . . . : 0,25 m;
- profondeur maximale : 0,25 m.

Il est constitué d'une structure métallique posée sur des piliers de parpaings de ciment. Le fond est métallique et les parois latérales sont composées de glaces de verre, dont la longueur est égale à 1,5 m, fixées à la structure par masticage. L'épaisseur des glaces est de 8 mm.

La pente du fond n'est pas réglable, mais elle peut être corrigée par un cimentage.

L'alimentation est assurée par une pompe puisant dans une citerne et refoulant dans un bac à niveau constant. La restitution se fait par l'intermédiaire d'une vanne guillotine, l'eau rejoignant la citerne par une canalisation. L'extrémité aval du canal permet de disposer un déversoir permettant la mesure des débits permanents.

La planche 4 montre le schéma du canal.

3,22 Appareillage de mesure des pertes de charge.

Les pertes de charge sont mesurées sur des écoulements permanents, non uniformes, la pente du fond n'étant pas réglable.

La charge totale est mesurée en chacune de six sections uniformément disposées le long du canal, dans l'axe de celui-ci (pl. 5).

Cette mesure se décompose en une mesure de cote en chaque section et une mesure de débit. La cote est obtenue au moyen de pointes limnimétriques directes. Le débit est donné par un déversoir.

3,23 Appareil assurant la vidange brusque d'une retenue.

PRINCIPE DE RÉALISATION.

On rappelle que le but poursuivi dans l'expérimentation réside dans l'étude du mouvement variable accompagnant la vidange brusque d'une retenue dans un canal prismatique, de parois verticales et de rugosité uniforme.

Après avoir envisagé d'autres formules, on s'est arrêté au choix d'une vanne s'effaçant verticalement. Cette disposition permet de ne laisser subsister dans le canal aucune trace de la vanne après sa suppression.

L'effacement ainsi réalisé est total, mais non instantané. Il est alors nécessaire de savoir dans quelle mesure le temps d'effacement de la vanne influe sur l'écoulement et de déterminer un seuil de ce temps au-dessous duquel sa valeur n'a plus d'influence sur l'écoulement en des abscisses choisies arbitrairement, mais faibles devant la longueur du canal. Ces conditions imposent de pouvoir régler le temps d'effacement de la vanne.

Il est également utile de pouvoir analyser l'écoulement au droit de la vanne et donc de disposer ce dernier dans une partie vitrée du canal.

En fait, le canal ne devant garder aucune trace de la vanne après son effacement, il faut s'affranchir de guidages intérieurs ou de dispositifs d'étanchéité solidaires du canal.

DESCRIPTION DE L'APPAREIL.

L'appareil est constitué d'une vanne étanche à ouverture rapide. Elle comporte deux plaques de plexiglas, rectangulaires, de largeur légèrement inférieure à la largeur intérieure du canal. Entre ces plaques, deux coins mobiles s'appuient sur une pièce de guidage ajustable, solidaires des plaques rectangulaires. Les coins mobiles sont rendus prisonniers par une bande de caoutchouc latérale, collée aux plaques rectangulaires, qui fait le tour de l'ensemble.

Une poussée verticale de haut en bas, exercée sur les coins mobiles par la tige de commande, donne naissance à une pression de l'ensemble sur le fond du canal et à des pressions latérales sur les glaces. La bande de caoutchouc assure l'étanchéité latérale; une bande de caoutchouc-mousse ajoutée sous l'ensemble s'applique sur le fond cimenté du canal.

Un réglage fixe permet d'adapter les plaques mobiles aux glaces du canal.

Les planches 6 et 7 montrent par le schéma et la photographie cet ensemble.

Le dispositif de commande est établi pour permettre un temps minimal de levée de 0,1 s, ce temps pouvant atteindre environ 1,5 s. Ces temps de levée sont les temps mis par la vanne pour parcourir les vingt-trois premiers centimètres de sa course, qui correspondent à la profondeur maximale de la retenue.

Après avoir envisagé une commande par poids qui ne permet pas une ouverture assez rapide, puis une commande pneumatique dont la mise en œuvre est délicate, c'est une commande élastique, assurée par un faisceau de sandows, qui est retenue.

Avant d'envisager le montage, il convient d'en définir les éléments.

D'une part, il faut imposer à la vanne une force d'éjection réglable, d'autre part, absorber l'énergie cinétique de la vanne à sa sortie du canal avant qu'elle ne heurte un obstacle.

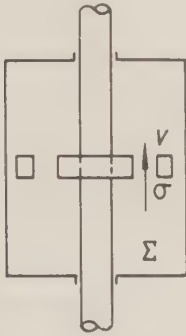


Fig. 10. — Schéma de l'amortisseur hydraulique

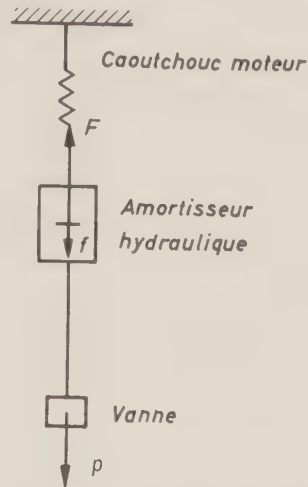


Fig. 11. — Schéma d'ensemble

En outre, le calcul montre que la force d'éjection nécessaire à l'obtention des temps de levée longs est très faible et il paraît vraisemblable qu'une force retardatrice parasite modeste immobilise la vanne au cours de son mouvement.

Ces considérations conduisent à intercaler entre caoutchouc de commande et vanne un amortisseur hydraulique dont le rôle est double : réglage possible du temps de levée, en conjugaison éventuelle avec le choix du caoutchouc moteur, et dissipation de l'énergie cinétique. Le premier rôle se double d'une autorégulation de l'effort moteur éliminant le risque d'immobilisation par force parasite aux temps longs de levée.

Le calcul de l'ensemble est conduit de la façon indiquée sur les figures 10 et 11. Soient :

F = la force d'éjection du caoutchouc;

f = la force retardatrice de l'amortisseur;

p = le poids de la vanne;

m = la masse de la vanne;

Σ = la section du cylindre de l'amortisseur;

σ = la section de passage dans le piston de l'amortisseur;

ρ = la densité du liquide de l'amortisseur;

y = l'ordonnée verticale de la vanne;

V = la vitesse d'écoulement du liquide.

Le mouvement de la vanne est régi par l'équation :

$$(1) \quad F - p - f = m \frac{d^2 y}{dt^2}.$$

On admet :

1° $F = F_0 - ky$ relation approximative pour le caoutchouc;

2° la perte de charge dans l'amortisseur est due uniquement à l'élargissement brusque de σ à Σ , soit :

$$(2) \quad f = \sum_2^{\rho} (V_{\sigma} - V_{\Sigma})^2.$$

L'équation (2) se transforme :

$$V_{\sigma} = V_{\Sigma} \frac{\Sigma}{\sigma} = \alpha V_{\Sigma} \quad \text{avec} \quad \alpha = \frac{\Sigma}{\sigma} > 1;$$

$$V_{\Sigma} = \frac{dy}{dt};$$

(2')

$$V_{\sigma} = \alpha \frac{dy}{dt};$$

$$f = \Sigma \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 (\alpha - 1)^2 \frac{\rho}{2}.$$

On pose :

$$\sum_2^{\rho} (\alpha - 1)^2 = K,$$

$$F_0 - p = \beta.$$

L'équation (1) devient alors :

$$\frac{d^2 y}{dt^2} - \frac{1}{m} \left[\beta - ky - K \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 \right]$$

de la forme :

$$y'' + \frac{k}{m} y + \frac{K}{m} y'^2 = \frac{\beta}{m}.$$

Un premier changement de variable permet de la mettre sous la forme d'une équation du premier ordre de BERNOLLI qu'un deuxième changement de variable permet d'intégrer :

$$\frac{dy}{dt} = \sqrt{\frac{k}{K} y + \frac{1}{K} \left(\beta + \frac{m k}{2 K} \right) + 1 - \frac{2 k}{\rho m} y}.$$

Le passage de $\frac{dy}{dt}$ à $y(t)$ est obtenu par intégration numérique pour chaque groupe de valeurs choisies pour F_0 et α .

Ce calcul montre que pour $F_0 = 40$ kg, $\Sigma = 0,00196$ m² et $\alpha = 6$, le temps de levée s'élève à 0,11 s et la hauteur maximale de la base de la vanne atteint 0,65 m.

Ce calcul néglige les forces de viscosité qui prennent naissance dans l'huile ainsi que différents frottements; ainsi, après réalisation du dispositif, les essais sont-ils faits en réduisant dès l'abord la valeur de α . Les essais montrent que le temps de levée réel est égal au temps calculé et que la hauteur maximale atteinte par la vanne est un peu inférieure à celle du calcul.

Des temps de levée plus longs sont obtenus en augmentant la valeur de α jusqu'à son maximum compatible avec la réalisation, puis en diminuant F_0 .

En outre, des temps plus courts peuvent être obtenus en majorant F_0 .

Les essais montrent que, pratiquement, le temps de levée de la vanne peut être choisi entre 0,07 s et 1,5 s avec une bonne fidélité de fonctionnement.

Un bâti de tubes est fixé au sol et au mur parallèle du canal. Il porte des rails de guidage pour la vanne et, du même côté, l'amortisseur hydraulique. Deux poulies à gorge sont montées folles à la partie supérieure.

La vanne porte des galets assujettis à se déplacer le long des rails de guidage. Elle est entraînée par une tige d'acier qui pénètre dans le cylindre de l'amortisseur par l'intermédiaire d'un joint torique et se visse dans une pièce du piston en acier. Une autre pièce du piston, vissée dans la première, en ménageant les lumières de section réglable, assure la transmission de l'effort à une tige supérieure qui, sortant du cylindre, se termine par une chape incapable de tourner grâce à un guidage. Un câble d'acier, accroché à la chape, passe sur les deux poulies supérieures, redescend sur le canal et se termine sur un étrier entourant le canal et auquel sont accrochés les sandows.

Le réglage des lumières ménagées dans le piston se fait par rotation de la tige de commande inférieure.

Dans sa position fermée, la vanne est maintenue par un verrou et la pièce verrouillée est telle qu'elle maintient une pression réglable sur un ressort de compression dont le rôle est d'exercer l'effort de haut en bas nécessaire, on le rappelle, à l'étanchéité de la vanne. Le déverrouillage libère l'effort d'étanchéité et, simultanément, laisse agir les sandows.

Un microrupteur, solidaire du bâti, est actionné par deux bossages solidaires de la vanne. Les deux bossages étant séparés de 23 cm, hauteur de levée, il suffit de monter en série le microrupteur avec un galvanomètre pour mesurer le temps de levée.

Un deuxième microrupteur, monté de façon analogue, permet le déclenchement d'une lampe flash électronique qui permet la photographie instantanée du début de l'écoulement.

L'ensemble du dispositif fait l'objet de la planche 7.

3,21 Appareillage de mesure des profondeurs et vitesses en fonction de l'abscisse et du temps.

MESURES DES PROFONDEURS.

Parmi les procédés de mesure des profondeurs rapidement variables, sont éliminés les procédés électriques utilisant des jauges à capacité ou à résistance variable, les premières très coûteuses en appareillage électronique, les autres d'une mise au point délicate.

La méthode utilisée repose sur la photographie, technique autorisée par les parois verticales transparentes du canal d'essai.

Une succession d'images, obtenues en des abscisses fixées et datées à partir de l'instant de l'effacement de la vanne, permet par dépouillement d'obtenir, soit des enregistrements de profondeur à abscisse donnée en fonction du temps, soit des lignes d'eau à instant donné.

Toutefois, l'écoulement n'étant pas avec certitude symétrique par rapport au plan vertical de symétrie du canal, il est nécessaire de prévoir la prise d'images simultanées de part et d'autre du canal. En raison, d'une part, de la proximité du mur parallèle au canal qui rend difficile la photographie du côté correspondant, d'autre part, de la difficulté d'obtenir une succession de couples d'images simultanées, on adopte la disposition suivante : un appareil photographique placé au-dessus du canal a son axe optique vertical; son champ déborde la largeur du canal et des miroirs inclinés permettent d'utiliser les parties marginales du champ pour la photographie des parois latérales. Chaque image comporte alors trois parties : une vue de dessus du canal et les deux vues latérales.

On voit, sur la planche 8, le schéma suivant lequel s'effectue la photographie.

Ce schéma appelle des remarques relatives à la précision de la mesure.

La lecture des profondeurs s'effectue sur des échelles graduées collées sur les faces extérieures des glaces latérales du canal. Cette disposition supprime toute erreur due à une distorsion quelconque, tant à la prise de vue qu'à la restitution.

Les erreurs commises sur la mesure peuvent se décomposer ainsi.

Erreur de lecture.

C'est l'erreur d'appréciation de la position sur l'échelle graduée du trait représentant le niveau de l'eau. Les graduations de l'échelle étant espacées de 5 mm, on peut estimer cette erreur à ± 1 mm.

Erreur systématique de positionnement des échelles.

Cette erreur a été réduite au minimum par l'artifice suivant : un petit appareil posé au fond du canal sur trois plots arrondis porte, à la cote 100 mm, une arête ayant pour longueur la largeur du canal et disposée transversalement dans ce dernier. Les échelles sont posées avec leur graduation 100 mm en coïncidence avec l'arête. On peut estimer l'erreur correspondante à $\pm 0,5$ mm.

Erreur de parallaxe.

Elle est due à l'épaisseur de la glace qui sépare le niveau de l'eau de l'échelle graduée et à l'angle sous lequel l'appareil photographique « voit » l'ensemble. Les angles étant petits, l'erreur de parallaxe est proportionnelle à la profondeur. Cette erreur relative constante est égale à $3/1\,000$; l'erreur absolue maximale atteint 0,7 mm qui reste inférieure à l'erreur de lecture. Il n'est pas tenu compte de l'erreur de parallaxe dans l'établissement des échelles graduées.

Erreur due à la formation de ménisque.

Le contact de l'eau et du verre donne naissance à un ménisque. Il faut savoir la relation qui existe entre le trait qui limite l'eau sur les clichés et la surface de cette eau.

Une surface d'eau au repos engendrerait au contact d'une paroi de verre propre un ménisque positif de l'ordre de 4 mm.

Ce ménisque présenterait aux rayons lumineux une transparence variable atteignant, pour une certaine cote, l'impression de l'émulsion photographique. Un tarage préalable permettrait d'apporter une correction systématique des lectures. En fait, ce ménisque parfait ne se produit pas dans le canal en exploitation. D'autre part, on a affaire à un écoulement de profondeur variable. Des observations dans un récipient de verre rempli d'eau montrent que les mouvements de l'eau se traduisent par des déformations de ménisque qui prend une amplitude positive dans les mouvements descendants et négative dans les mouvements ascendants.

Dans ce cas de ménisque variable, on est tenté d'obtenir un ménisque déformable certes, mais systématiquement négatif. L'erreur de ménisque se ramènerait en effet à une petite erreur de parallaxe supplémentaire, la ligne de séparation eau-air vue sur le film correspondant à la trace du plan tangent à la surface convexe du ménisque.

Des essais, effectués dans un récipient de verre sur les parois duquel un film de résine de silicone a été appliqué à froid, sont décevants; d'une part, le film de silicone se désagrége rapidement, d'autre part, le ménisque obtenu, pratiquement nul au repos, subit des changements de signe quand on donne à l'eau des mouvements ascendants et descendants.

Finalement, on ne tient pas directement compte de l'erreur de ménisque. Une circonstance favorable justifie partiellement cette position. Dans la région aval de la vanne, l'écoulement est ascendant, entraînant la formation d'un ménisque négatif. L'erreur absolue correspondante est, on l'a vue, plus faible et, de plus, elle tend vers zéro avec la profondeur au même titre que l'erreur de parallaxe dont elle est un terme supplémentaire. Dans la région amont de la vanne, l'écoulement est descendant; il s'ensuit un ménisque positif qui entraîne une erreur absolue probablement assez importante, mais dont la valeur relative est faible puisque les profondeurs restent supérieures à 100 mm. Un essai sur eau au repos est relaté au paragraphe 3,43 qui justifie les mesures faites sur ces bases.

En résumé, on peut considérer que :

— dans la région amont de la vanne, l'erreur absolue est sensiblement constante et inférieure à 2,5 mm; l'erreur relative correspondante atteint 1 à 2 % de la profondeur suivant celle-ci;

— dans la région aval de la vanne, l'erreur comporte une erreur absolue inférieure à 1 mm, à laquelle s'ajoute une erreur relative constante inférieure à 0,5 %. Au voisinage du front d'onde sur fond sec, la profondeur est donc connue à 1 mm près.

Le principe de mesure photographique admis, des essais permettent le choix du type d'appareil de prises de vues et de son montage.

La nature même du phénomène à analyser incite à la cinématographie. Dans le champ de la caméra, une horloge électrique date les images. Le format 16 mm, maniable et relativement économique en matériel et en film, paraît adapté à cet usage. En fait, les essais effectués justifient le principe de la mesure, mais montrent que le format 16 mm, par la petitesse de ses images, n'autorise par une précision de lecture satisfaisante; le pouvoir séparateur est insuffisant. Le format 35 mm, dans ces conditions, s'impose, mais son prix d'utilisation considérable amène à chercher une autre solution.

La solution retenue consiste à utiliser des appareils photographiques automatiques de format 24×24 mm. La cadence possible de prises de vues, plus faible, reste suffisante et ces appareils sont moins coûteux d'achat et d'exploitation.

Les appareils sont déclenchés électriquement et à chacune de leur prise de vue, ils avisent un enregistreur utilisé en chronographie.

Le nombre de sections de mesure distribuées le long du canal est choisi arbitrairement égal à 10. Leur répartition figure sur la planche 5.

Il n'est pas question de prévoir dix dispositifs de prises de vues simultanées, aussi se contente-t-on de prévoir quatre postes de prises de vues simultanées, un des quatre postes restant fixe, les trois autres pouvant successivement analyser chacun trois sections. Trois essais identiques successifs permettent la mesure dans les dix sections, l'appareillage fixe fournissant une référence de comparaison. Les premiers essais d'exploitation justifient, on le verra, cette façon d'opérer.

Les appareils, au nombre de quatre, sont du type « Robot Recorder », de fabrication Berning. Un moteur à ressort incorporé a la charge du défilement du film et de l'armement de l'obturateur après chaque prise de vue. Un télédéclencheur électromagnétique provoque la prise de vue à sa mise sous tension et la prise « flash », dont est munie l'appareil, signale à un enregistreur que la photographie est prise. Dans le cas particulier, l'autonomie assurée par le ressort incorporé est insuffisante on a recours à un moteur électrique, fourni par le constructeur, qui se charge de rebander le ressort entre chaque déclenchement. L'autonomie atteint alors les cinquante à cinquante-cinq vues qu'emmagasine le chargeur de l'appareil.

La cadence de prises de vues peut atteindre cinq à six images par seconde, l'obturation permet le choix d'un temps d'exposition compris entre $1/500$ de seconde et la pose, et l'objectif de 38 mm de distance focale peut s'ouvrir à $f/2,8$. Dans le cas particulier, le temps d'exposition est égal à $1/250$ de seconde et l'ouverture de l'objectif est fixée à $f/5,6$; ces conditions s'appliquent à l'utilisation du film Gevapan 27° Scheiner, développé en révélateur contraste.

Chaque appareil est fixé à un « chariot photographique » mobile, qui comporte, en outre, son éclairage, soit quatre lampes survoltées Westrex de 250 W chacune et son tableau électrique chargé des liaisons avec les sources d'électricité et le poste central de télécommande.

Les planches 8 et 9 montrent par le dessin et la photographie un chariot photographique et un appareil de prises de vues.

L'opacité de l'eau nécessaire au contraste est obtenue en ajoutant à l'eau une petite quantité (10 g par mètre cube) de « Nigrosine » de fabrication Kulhmann.

Les dépouillements de clichés s'effectuent sur une table lumineuse dont l'écran carré a 0,60 m de côté. La projection obtenue est à l'échelle 1/2.

La table, de fabrication « Microfilm Service », permet le défilement continu des images en avant et en arrière avec blocage sur l'image choisie. Elle permet, en outre, la rotation complète de l'image, cette disposition facilitant éventuellement les observations successives des deux faces latérales du canal.

Le poste central de télécommande groupe plusieurs appareils :

- un émetteur d'impulsions;
- une base de temps;
- un enregistreur.

Le rôle de l'émetteur d'impulsions est de provoquer les prises de vues des appareils Robot. Il sert, de plus, de relais aux divers signaux enregistrés et contient la base de temps.

La nécessité d'économiser les vues disponibles dans les magasins d'appareils tout en conservant une cadence de prises de vues suffisantes pendant les mouvements rapides du plan d'eau, et d'éviter de fatiguer les appareils en les faisant fonctionner à des moments où c'est inutile, ou à une cadence exagérée, a conduit à demander à l'émetteur les performances suivantes :

— envoi de tops de prises de vues à un appareil quelconque à partir du moment où il est utile que cet appareil démarre, c'est-à-dire à l'arrivée du front d'onde positif en aval, négatif en amont;

— les prises de vues étant ainsi déclenchées à une cadence réglable, comprise entre quatre et six images par seconde, division par 2 de cette cadence au bout d'un temps prédéterminé réglable;

— synchronisation des prises de vues des appareils en fonctionnement simultané.

Le problème ainsi posé est résolu par voie électromécanique.

La première condition est respectée de la façon suivante, en aval de la vanne : deux électrodes dont une est immergée initialement sont court-circuitées à l'arrivée du front d'onde. Un relais met sous tension un électro-aimant qui, à son tour, déclenche un microrupteur; le circuit du télédéclencheur est ainsi fermé sur son alimentation et l'appareil photographique fonctionne.

La deuxième condition est assurée par une temporisation mécanique réglable agissant sur un autre microrupteur.

La troisième condition est respectée simplement par l'adoption d'une came unique commandant un microrupteur unique, inséré sur les quatre circuits des télédéclencheurs.

Une base de temps à mécanisme d'horlogerie battant la seconde envoie des signaux à l'enregistreur.

De marque « Kelvin-Hughes », l'enregistreur à inscription électrique possède quatre voies d'origine. Un topeur de base de temps « Sefram », à encre, a été modifié pour assurer l'inscription électrique et adapté à l'enregistreur.

Chacune des quatre voies à galvanomètres reçoit les signaux de prises de vues émis par les prises « flash » des appareils photographiques. L'une d'entre elles reçoit de plus les signaux émis par les microrupteurs de la vanne, qui fixent l'instant zéro et le temps de levée de la vanne. Le topeur additionnel reçoit les impulsions émises par la base de temps.

Deux vitesses de déroulement du papier sont possibles : 5 cm/s et 15 cm/s.

Les erreurs de lecture commises sur les dates de signaux par rapport à l'instant zéro sont inférieures à 1/50 de seconde et 1/150 de seconde suivant la vitesse de déroulement choisie.

On voit sur la planche 10 l'appareillage décrit ci-dessus.

MESURES DES VITESSES.

On entend par vitesse moyenne spatiale de l'écoulement, le rapport $\frac{Q}{S}$ du débit instantané en une abscisse par la section de l'écoulement à travers laquelle passe le débit.

La mesure est indirecte. Elle suppose déterminées les lignes d'eau instantanées, séparées d'un temps Δt . La différence de volume obtenue pendant le temps Δt , à l'amont ou à l'aval de l'abscisse considérée, divisée par le temps Δt , conduit à la vitesse moyenne cherchée, ou plus exactement à cette vitesse moyenne sur le temps Δt . On a, en désignant par W le volume d'eau situé en aval de la section de mesure :

$$u = \frac{W_{t+\Delta t} - W_t}{\Delta t \left(\frac{S_{t+\Delta t} + S_t}{2} \right)}.$$

Il paraît intéressant de compléter la mesure des vitesses moyennes d'écoulement par une mesure des vitesses en surface, si possible pour plusieurs ordonnées transversales.

La méthode consiste à mesurer les vitesses de flotteurs par photographies successives.

Les flotteurs sont constitués de rondelles de liège aggloméré sur les faces desquelles sont collées des émulsions photographiques à support plastique. Des motifs permettent la discrimination des flotteurs.

Au nombre d'une centaine, les flotteurs sont disposés sur un distributeur à trois tapis roulants de caoutchouc. Le distributeur est lui-même placé en amont d'un des « chariots photographiques », et sa mise en route est assurée par les mêmes électrodes qui commandent le démarrage de l'appareil de prises de vues du chariot.

La planche 10 présente ce dispositif ainsi que quelques flotteurs.

La vue en plan obtenue sur chaque cliché photographique permet la détermination de l'abscisse et de l'ordonnée transversale des flotteurs qui sont dans le champ. La différence d'abscisse de chaque flotteur rapportée au temps qui sépare deux clichés donne sa vitesse moyenne au cours de son déplacement.

3,3 CARACTÉRISTIQUES DE PERTES DE CHARGES PRÉSENTÉES PAR LE CANAL D'ESSAIS

La perte de charge de l'écoulement est définie par la relation :

$$\Delta H = \lambda \cdot \frac{U^2}{2g} \cdot \frac{L}{4R_H};$$

la détermination du coefficient de perte de charge λ est assurée par la mesure en écoulement permanent de ΔH , du débit Q , et de la section de l'écoulement S .

Le canal, à fond presque horizontal, ne peut être le siège que d'un écoulement varié, ce qui oblige à décomposer la longueur du canal en tronçons élémentaires.

3,31 Fond lisse.

Dans la première série d'essais, le canal comporte un fond en ciment lisse. La probabilité que ce fond se comporte comme hydrauliquement lisse, incite à admettre le coefficient comme fonction du nombre de Reynolds seul. L'expérience est donc conduite à plusieurs débits sans souci de la profondeur, celle-ci n'intervenant que dans le calcul du nombre de Reynolds. Les résultats obtenus font l'objet de la planche 11 qui porte, de plus, la droite dite de BLASIUS, définie par : $\lambda = 0,316 R^{-1/4}$. On constate le bon accord entre cette droite et les mesures obtenues en canal; cet accord confirme l'hypothèse que le fond se comporte comme hydrauliquement lisse. Il est possible d'extrapoler les mesures faites à un domaine de nombre de Reynolds un peu plus important que celui exploité.

La planche 12 montre le domaine de nombre de Reynolds présenté par l'écoulement variable ($\lambda = 0$). Compte tenu de ce que l'écoulement réel se limite vers l'aval à une valeur de $\frac{1}{\tau_{1,38}}$ de l'ordre de 1, on constate que l'extrapolation nécessaire en nombre de Reynolds reste faible.

3,32 Fond rugueux.

Les essais de la deuxième série sont conduits en présence d'un fond dont la rugosité est définie par la planche 13. On est tenté de considérer la perte de charge occasionnée par la rugosité du fond largement prépondérante devant celle que provoque la présence des parois latérales lisses. Avec cette hypothèse, tout revient à considérer le canal comme infiniment large, le rayon hydraulique prenant alors la valeur de la profondeur h . On définit alors un coefficient de perte de charge :

$$\lambda_h = \frac{\Delta H}{\frac{U^2}{2g} \cdot \frac{L}{4h}}.$$

Les essais sont conduits à profondeur variable sans souci *a priori* des variations des nombres de Reynolds. Les résultats obtenus figurent sur la planche 14. L'axe des abscisses porte le rapport $\frac{h}{k}$, k désignant la hauteur des aspérités (pl. 13).

La planche 14 porte également la droite de pente $\frac{1}{3}$ concrétisant les résultats de R. F. DRESSLER [7], qui utilise comme rugosité des baguettes de 6,25 mm de côté, collées transversalement tous les 25 mm. On constate :

1° que les résultats présentés suivent dans l'ensemble la loi obtenue par l'auteur précité, ce qui semblerait indiquer que la différence de forme des aspérités dans les deux expérimentations jouent un rôle secondaire; on peut noter également la bonne concordance des résultats obtenus avec les données du diagramme de MOODY;

2° que les points de mesure présentent une certaine dispersion; aussi est-on conduit à supposer que la rugosité relative ne constitue pas le seul paramètre dont dépend le coefficient λ_h ; ce phénomène peut être attribué à l'hétérogénéité des parois, la perte de charge occasionnée par les parois latérales lisses étant non négligeables et fonction du nombre de Reynolds.

Afin d'avoir une idée qualitative de l'influence éventuelle du nombre de Reynolds, on a porté sur la planche 15 les valeurs du coefficient λ_h , en fonction du nombre de Reynolds. La dispersion est grande, mais il est possible de grouper les points autour d'une droite de pente $-\frac{1}{4}$ égale à celle de la droite de BLASIUS. L'influence du nombre de Reynolds paraît certaine, mais l'ensemble expérimental ne permet guère de faire varier séparément la rugosité relative et le nombre de Reynolds. On est conduit, en dépit de de leur précision moyenne, à accepter les résultats obtenus; une analyse approfondie des pertes de charge en canal à parois hétérogènes, sort du cadre de la présente étude.

3,4 **ESSAIS PRÉLIMINAIRES D'ÉCOULEMENTS VARIABLES**

La mise au point des appareillages étant terminée, les premiers essais systématiques portent sur :

- le fonctionnement de la vanne;
- la photographie du début de l'écoulement pour plusieurs temps de levée de la vanne;
- le contrôle des indications de cotes d'écoulement lues sur les clichés photographiques;
- le contrôle de fidélité de l'écoulement pour des essais faits dans des conditions identiques;

l'influence sur l'écoulement des temps de levée de la vanne.

3,41 **Fonctionnement de la vanne.**

Ainsi qu'il est signalé au paragraphe 3,23, le temps de levée de la vanne peut être prédéterminé entre 0,07 s et 1,5 s, l'erreur de fidélité sur ces temps étant inférieure à 10 %.

3,42 Photographies du début de l'écoulement.

Ces photographies sont obtenues suivant la technique de l'« open flash », avec un flash électronique commandé par la vanne elle-même, au moment où sa base atteint la cote de la retenue. Effectuées pour des temps de levée de 0,09 s, 0,12 s, 0,16 s, elles sont présentées sur la planche 16. Elles montrent l'influence du temps de levée. L'écoulement proprement dit est accompagné de nombreuses gouttelettes entraînées par la base de la vanne. Le fond aval n'était pas rigoureusement sec avant l'essai; il s'ensuit la formation d'un ressaut bien visible.

On peut conclure que ces temps d'ouverture correspondent qualitativement à un effacement instantané.

3,43 Contrôle des indications de cote lues sur les clichés photographiques.

Impossible à effectuer sur un écoulement variable, ce contrôle est fait sur une succession de plans d'eau au repos à différentes cotes. Il consiste à comparer les cotes lues sur une pointe limnimétrique avec les cotes lues sur les échelles graduées des clichés photographiques. L'expérience montre que, dans le cas des plans d'eau au repos, l'écart entre les deux indications est inférieur aux erreurs de lecture estimées à un millimètre. On peut en conclure que les erreurs, attribuées au ménisque sur les glaces et à la parallaxe due à la traversée des glaces par les rayons optiques, sont faibles.

3,44 Contrôle de fidélité de l'écoulement.

Ce contrôle est essentiel car, de la fidélité de l'écoulement dépend la validité de la méthode de mesure. L'analyse des dix abscisses du canal implique, on le rappelle, trois essais consécutifs dans les mêmes conditions.

Le contrôle est effectué en quatre abscisses : — 11,8 m, — 2,2 m, + 3,10 m, + 9,30 m par rapport à la vanne.

La hauteur d'eau initiale amont fixée à 225 mm, le contrôle est fait avec fond initialement sec en aval (pl. 17), puis avec une profondeur initiale aval de 80 mm.

On constate que, compte tenu des légères différences de cotes initiales amont et aval, la fidélité de l'écoulement est satisfaisante.

Ces essais permettent, en outre, de constater que l'écoulement est symétrique, les différences de profondeur entre les deux rives étant inférieure à 1 mm.

3,45 Mesure de l'influence sur l'écoulement du temps d'effacement de la vanne.

On rappelle que le temps de levée de la vanne n'est pas, à proprement parler, un paramètre de l'étude expérimentale. Le faire varier a pour but de définir un seuil au-dessous duquel le temps de levée n'intervient plus sur l'écoulement, autrement dit, en dessous duquel l'effacement peut être considéré comme instantané. Ceci suppose choisies arbitrairement les abscisses amont et aval où se font les observations. Ces abscisses sont fixées pour ces essais à : + 3,1 m et — 2,2 m.

Les essais sont effectués avec plusieurs temps de levée successifs pour une profondeur initiale amont égale à 225 mm et, successivement, avec fond initialement sec en aval et avec une profondeur initiale aval égale à 80 mm.

La planche 18 montre les résultats obtenus sur profondeur de 80 mm. On constate qu'aux abscisses d'observation choisies, l'influence du temps de levée n'apparaît guère jusqu'à un temps égal à une seconde. Cette circonstance justifie la conception de la vanne et étend le domaine de validité de l'hypothèse théorique d'effacement instantané.

3,5

ESSAIS SUR FOND LISSE

La première série d'essais se caractérise par :

$$i = \frac{12}{100\ 000}$$

et la rugosité minimale ε_1 .

Le temps de levée de la vanne est fixé à 0,12 s.

Il était prévu un radier horizontal. Le contrôle effectué après confection du radier montre une contre-pente moyenne qui paraît assez faible pour être conservée.

La rugosité minimale est obtenue avec un revêtement de fond en ciment lissé. Les mesures de λ déjà effectuées montrent que le fond ainsi obtenu se comporte comme hydrauliquement lisse. Il est donc inutile de réaliser un fond plus poli.

Les essais de la série sont désignés par un numéro et définis comme suit :

NUMÉROS DES ESSAIS	H_0	h_0
	(mm)	(mm)
1 B	230	0
2 B	230	5
3 B	230	10
4 B	230	20
5 B	230	40
6 B	230	80
7 B	230	160
8 B	115	0

Les essais 1 B et 8 B, conduits sur fond sec, diffèrent par la profondeur de la retenue et donc par le nombre de Reynolds.

3,51 Résultats bruts des mesures.

On rappelle que les mesures portent sur les profondeurs instantanées de l'écoulement en dix sections transversales désignées par s_n et dont les abscisses sont précisées sur la planche 5.

Les tableaux I à VIII présentent les résultats obtenus.

La section S 4, en temps que section de référence, est l'objet de photographies, à la fois pour les trois effacements de vanne, nécessités par chaque essai. Il est ainsi possible de vérifier, pour chaque essai, la fidélité de l'écoulement.

On observe, pour les essais 4 B, 5 B, 6 B et surtout pour l'essai 7 B, l'existence d'ondes secondaires à la suite du front. Elles feront l'objet d'une analyse au paragraphe 3,82.

3,52 Lignes d'eau instantanées.

Les lignes d'eau instantanées de l'écoulement variable sont obtenues à partir des profondeurs à instants fixés. Il est fait abstraction des phénomènes auxiliaires qui constituent des déformations locales telles que les ondes secondaires.

Le petit nombre de points définissant chaque ligne (dix au maximum) amène à la construire, d'une part, en respectant les points obtenus suivant la méthode ci-dessus, d'autre part, en tenant compte de la continuité de l'évolution et des renseignements photographiques.

Les planches 19 à 22 montrent quatre exemples des lignes obtenues.

La forme et la position extrême du front d'onde négative amont est moins bien définie que celles du front positif aval. Cela tient au fait qu'à l'amont la tangente au profil d'onde est horizontale.

3,53 Vitesses d'écoulement.

VITESSES MOYENNES SPATIALES.

Les vitesses moyennes spatiales sont déterminées suivant la méthode exposée au paragraphe 3,24.

Pratiquement, l'évaluation des quantités d'eau traversant la section pendant le temps Δt nécessite le tracé de profils instantanés espacés d'un Δt suffisant, ce qui diminue le caractère d'instantanéité de la vitesse obtenue.

Dans les présents essais, le calcul des vitesses est conduit de la façon suivante.

Les lignes d'eau instantanées se suivent de seconde en seconde. La section étant rectangulaire et de largeur constante, le volume d'eau passé peut se déterminer par planimétrage des surfaces séparant les profils consécutifs en partant de l'aval, c'est-à-dire du front de l'onde positive. Chaque volume d'eau passé pendant une seconde est divisé par la section moyenne d'écoulement. On obtient finalement une succession de paliers de vitesse de seconde en seconde.

On serait tenté de faire la même opération à partir de l'amont et de comparer dans chaque cas les résultats obtenus. Mais le front de l'onde amont est beaucoup moins bien défini parce que chaque profil est alors à tangente horizontale et la comparaison serait illusoire.

Les planches 23 à 25 portent certains résultats obtenus par ce dépouillement. La dispersion est grande et inhérente, en partie, au petit nombre de points définissant les lignes instantanées.

Il est possible de chiffrer grossièrement l'erreur commise dans la détermination des vitesses. En effet, les résultats des essais 1 B à 4 B sont assez en accord avec les

résultats de la théorie des écoulements sans perte de charge, développée au chapitre II, pour que l'on puisse affirmer que, pour ces essais, il se produise une section critique ne dépendant que des conditions initiales amont. On peut en conclure que, pour ces essais, les écoulements en amont de la vanne doivent être identiques à tous égards. De fait, il en est ainsi, aux erreurs de mesures près, pour les profondeurs. La comparaison des vitesses dans les sections S 1 à S 4 pour ces essais permet d'apprécier leur dispersion. Elle montre que cette dispersion est de valeur absolue constante de l'ordre de $\pm 0,05$ m/s, atteignant exceptionnellement 0,08 m/s. Ce contrôle est sévère puisqu'il se fait sur des sections amont et que la cubature se fait en partant de l'aval; il peut y avoir accumulation d'erreurs plus grandes que pour des sections placées en aval. Si l'on assimile cette dispersion à l'erreur de mesure, on peut dire que l'erreur absolue commise sur la détermination des vitesses est inférieure à $\pm 0,05$ m/s ce qui conduit à une erreur relative dans la région aval de la vanne inférieure à ± 5 %.

Sur les mêmes planches figurent des courbes moyennes expérimentales qui respectent à la fois la dispersion possible définie précédemment et les allures fournies par la théorie sans perte de charge du chapitre IV.

VITESSES DE SURFACE.

Dans le but de caractériser les profils instantanés de vitesse, nous avons mesuré par chronophotographies les vitesses de surface (§ 3,24).

Les planches 26 et 27 données en exemple portent à la fois les vitesses moyennes spatiales déterminées antérieurement et les valeurs des vitesses mesurées par les flotteurs. La dispersion des résultats de mesure de vitesse superficielle est considérable; l'influence de l'ordonnée transversale n'a pu être mise en évidence. Sans doute les flotteurs sont-ils soumis à des variations de vitesse sur des ondulations de la surface.

Toutefois, on peut faire les observations suivantes :

1° au voisinage de la vanne (section S 5), les vitesses moyennes et de surface sont sensiblement égales. Le profil des vitesses doit être à peu près uniforme;

2° au proche amont de la vanne, les vitesses de surface sont plus faibles que les vitesses moyennes; l'eau semble appelée par le fond, ce qui tient peut-être au mode d'effacement;

3° plus on s'éloigne vers l'aval de la vanne, plus le rapport de la vitesse de surface à la vitesse moyenne s'accroît; il atteint dans ces essais un maximum d'environ 1,25.

3,6

ESSAIS SUR FOND RUGUEUX

La deuxième série d'essais est caractérisée par la pente :

$$i = \frac{12}{100\,000}$$

et la rugosité ϵ_2 .

Le temps de levée de la vanne est fixé à 0,12 s.

Le radier est conservé avec sa légère contre-pente afin de faciliter les comparaisons entre les deux séries d'essais. La rugosité est obtenue en répartissant sur le radier du

canal, d'une façon géométrique et rigoureuse, des petits cylindres d'un diamètre de 18 mm et de 8 mm de hauteur, en matière plastique et maintenus en position par des plaques perforées (pl. 13).

Les essais sur fond rugueux sont désignés d'un numéro suivi de la lettre C.

NUMÉROS DES ESSAIS	H_0	h_0
	(mm)	(mm)
1 C	230	0
2 C	230	10
3 C	230	40
4 C	230	160

3,61 Résultats bruts des mesures.

Les tableaux IX à XII portent les résultats.

La section S 4 est à nouveau utilisée comme référence de fidélité pour les trois effacements que nécessite un essai.

Comme son parallèle sur fond lisse (essai 7 B), l'essai 4 C révèle l'existence d'ondes secondaires derrière le front d'onde.

3,62 Lignes d'eau instantanées (pl. 28 et 29).

Les lignes d'eau instantanées sont déterminées comme celles des essais sur fond lisse (§ 3,52).

Pour conserver une lecture facile des lignes, le Δt des essais 1 C, 2 C et 3 C est de 2 s à la différence de l'essai 4 C où Δt a pour valeur 1 s.

En comparant les deux séries d'essais, on peut remarquer que la rugosité intervient peu dans l'évolution de la ligne d'eau en amont de la retenue; c'est seulement aux environs de la section S 4 que la ligne d'eau, en prenant une forme plus tendue, diffère de celles des essais sur fond lisse. Mais dans l'ensemble, on peut affirmer qu'il n'y a que peu de changement entre les deux séries d'essais dans la vidange de la retenue. Par contre, à l'aval, l'évolution de la ligne d'eau est très différente sur fond sec et faible tirant d'eau aval : le front d'onde est très ralenti et la conséquence en est le gonflement très marqué de la ligne. Cette différence va en diminuant pour les plans d'eau avals plus élevés.

3,63 Vitesses d'écoulement.

VITESSES MOYENNES SPATIALES.

Les planches 30 et 31 montrent des exemples des résultats obtenus. Comparativement aux résultats de la première série d'essais, on peut observer en aval de la vanne une diminution des vitesses moyennes, cet effet se faisant très nettement sentir sur fond sec ou sur faible tirant d'eau aval, mais devenant presque négligeable quand le tirant d'eau aval initial est important.

VITESSES DE SURFACE.

Comparativement aux résultats des essais sur fond lisse, on peut observer un très net accroissement du rapport entre la vitesse de surface et la vitesse moyenne; cet accroissement relatif qui s'observe en amont et en aval de la vanne, témoigne de la déformation du profil des vitesses due à la rugosité.

3,7 PRÉSENTATION ADIMENSIONNELLE DES RÉSULTATS D'ESSAIS EN PRÉSENCE DES RÉSULTATS THÉORIQUES CORRESPONDANTS SANS PERTES DE CHARGE COMPARAISON AVEC LES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DE R.F. DRESSLER

Utilisant les grandeurs sans dimension introduites auparavant nous avons disposé sur les mêmes planches les résultats expérimentaux et les résultats théoriques du chapitre II.

3,71 Trajectoires des fronts d'ondes.

On entend par trajectoire du front d'onde son lieu géométrique dans le plan (x, t) ou (ξ, τ) .

FOND LISSE.

Les planches 32 à 39 présentent les trajectoires du front d'onde pour les deux valeurs de H_0 essayées (essais 1 B et 8 B) et pour les six valeurs de η_0 réalisées pour $H_0 = 230$ mm.

La planche 33 permet d'apprécier l'influence de H_0 .

On constate que l'écart entre ψ_f théorique et ψ_f expérimental, très grand pour $\eta_0 = 0$ (fond sec) s'atténue d'autant plus que η_0 est grand. Ceci tient à la diminution de la vitesse d'écoulement quand η_0 croît et donc de la perte de charge.

Les planches 40 et 41 présentent les résultats obtenus par R. F. DRESSLER sur fond sec horizontal avec un coefficient λ voisin de celui caractérisant nos essais. La planche 40 permet de constater l'accord entre les deux expérimentations pour les valeurs de τ assez grandes. Sur la planche 41, se trouvent les résultats de DRESSLER et ceux de nos essais pour les petites valeurs de τ . L'accord est moins satisfaisant et nous supposons que cette première phase de l'écoulement est fortement fonction des temps de levée de la vanne, inconnus de nous pour les essais de DRESSLER.

FOND RUGUEUX.

Les planches 42 à 47 représentent les trajectoires du front d'onde pour les quatre valeurs de η_0 réalisées, H_0 restant constant. On constate que l'écart entre ψ_f théorique et ψ_f expérimental, très grand sur fond sec, s'atténue d'autant plus que η_0 est grand.

Les planches 46 et 47 représentent les résultats obtenus par R. F. DRESSLER sur fond sec avec rugosité très voisine de celle de nos essais; comme pour les essais sur fond lisse, l'accord est satisfaisant, surtout pour les valeurs de τ élevées.

3,72 Lignes d'eau.

FOND LISSE.

Les lignes d'eau sont présentées pour quelques valeurs de τ sur les planches 48 à 55, en présence des lignes théoriques du chapitre II. Ici encore, l'accord est d'autant meilleur avec la théorie simplifiée que η_0 est grand.

Les planches 56 et 57 montrent les résultats de DRESSLER pour les deux valeurs de H_0 qu'il a envisagées. L'accord est satisfaisant à égalité de τ entre ces résultats et ceux que nous avons obtenus (pl. 48 et 49).

FOND RUGUEUX.

Les lignes d'eau sont représentées sur les planches 58 à 61, ainsi que les lignes théoriques pour $\lambda = 0$.

La planche 62 montre les résultats de DRESSLER sur fond sec. L'accord est satisfaisant entre ces résultats et ceux que nous avons obtenus.

3,73 Répartitions longitudinales des vitesses moyennes spatiales.

FOND LISSE.

Ces répartitions sont présentées sur les planches 63 à 70. Aucune comparaison n'est possible avec les résultats de DRESSLER, les vitesses obtenues dans ses essais n'étant pas publiées.

FOND RUGUEUX.

Les répartitions sont présentées sur les planches 71 à 74, comparées à celles caractérisées par $\lambda = 0$; on voit très nettement l'effet déterminant de la rugosité sur les vitesses, en particulier, pour des η_0 petits.

3,74 Répartitions longitudinales des nombres de FROUDE.

Les variations du nombre de FROUDE le long de l'écoulement sont représentées accompagnées des courbes théoriques caractérisées par $\lambda = 0$.

Les courbes expérimentales sont arrêtées à la valeur à partir de laquelle la forme du front proprement dit fait apparaître un nombre de FROUDE croissant brutalement et indéfiniment qui perd dans cette région locale sa signification physique.

FOND LISSE.

Certains résultats sont portés sur les planches 75 à 78.

On constate un déplacement vers l'aval de la section critique $\mathcal{F} = 1$ lorsqu'augmente τ .

FOND RUGUEUX.

Les planches 79 à 82 portent les courbes correspondantes. Les mêmes phénomènes que dans les essais sur fond lisse sont observés ici, mais beaucoup plus accusés puisque la planche 79 montre un écoulement entièrement subcritique sur fond sec pour $\tau = 130$.

3,8 PHÉNOMÈNES SUPERPOSÉS A L'ÉCOULEMENT D'ENSEMBLE

Dans tout ce qui précède, on a fait abstraction des phénomènes locaux ou des oscillations autour de valeurs moyennes. Ces phénomènes ou ces oscillations peuvent revêtir une grande importance et on a essayé de les préciser à partir des essais effectués.

3,81 Surélévation locale à l'aval de la section d'établissement du débit.

Les planches 83 et 84 montrent les trois premières photographies de chaque essai dans la section de mesure S 5 voisine de la vanne.

On constate à l'aval de la vanne une surélévation locale importante qui varie d'un essai à l'autre donc avec η_0 . Nous avons cherché à la caractériser. Tout d'abord, l'examen des films montre que cette surélévation se propage vers l'aval avec l'écoulement d'ensemble, mais diminue rapidement d'amplitude. Il suffit donc de mesurer l'amplitude maximale sur les clichés présentés.

Désignons par η_f la profondeur relative maximale que nous nous proposons de comparer à la profondeur relative du corps de l'onde positive de l'écoulement d'ensemble. On définit la profondeur relative expérimentale η_{w0} du corps de l'onde positive en extrapolant jusqu'à $t = 0$ les profondeurs η_w expérimentales mesurables. Si l'on reporte alors la valeur η_{w0} ainsi obtenue sur la courbe théorique $\eta_w = f(\eta_0)$ de la planche 1, on constate un accord satisfaisant. On peut en déduire que le calcul de l'état initial du front de l'onde positive est correct (chap. II); la connaissance expérimentale de $\frac{\eta_f}{\eta_w}$ suffit donc à prédéterminer la surélévation maximale possible dans les conditions d'essais. On trouve sur la planche 1 la courbe $\eta_f = f(\eta_0)$.

Ces résultats sont à rapprocher de ceux obtenus par R. LÉVIN qui a étudié l'écoulement de rupture dans sa première phase. Nos essais conduisent à des surélévations locales plus élevées que celles obtenues par cet auteur à égalité de η_0 , mais nous ne connaissons pas les conditions précises de ses expérimentations. La rugosité ne semble pas apporter une notable modification au rapport $\frac{\eta_f}{\eta_w}$, mesuré dans l'écoulement sur fond lisse.

3,82 Ondes secondaires de FAVRE.

Rappelons qu'on désigne par ondes secondaires de FAVRE, les ondes qui se manifestent derrière le front raide d'une onde de translation d'amplitude finie. Elles ont été étudiées expérimentalement par H. FAVRE qui en a déterminé l'amplitude et la longueur d'onde en fonction de l'amplitude relative du corps de l'onde moyenne.

La liste de notations (p. 1) définit les grandeurs caractéristiques de ces ondes.

Nous avons cherché à comparer les ondes secondaires obtenues dans nos essais avec celles mesurées par FAVRE et, à cet effet, nous avons porté sur les planches 85 et 86 les courbes représentant les résultats de FAVRE et les quelques points expérimentaux que nous avons obtenus sur fond lisse (pl. 85) et sur fond rugueux (pl. 86).

Il faut tout de suite préciser que FAVRE n'a fait ses mesures qu'après stabilisation complète des ondes, soit à une distance de l'ordre de $400 h_0$, alors que nous ne pouvions faire d'observations que jusqu'à une distance de $85 h_0$ pour les essais 7 B et 4 C et de $170 h_0$ pour l'essai 6 B. En outre, pour l'essai 6 B, nous ne pouvons faire la comparaison avec la courbe de FAVRE que dans une région d'extrapolation.

On remarque qu'amplitude et longueur d'ondes que nous avons obtenues sont inférieures à celles de FAVRE; toutefois, ces grandeurs se rapprochent de celles de FAVRE au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la vanne. On est donc en droit de penser que les ondes que nous mettons en évidence sont bien les ondes de FAVRE, qui prennent naissance derrière le front d'onde positif; ceci n'a rien de surprenant, l'écoulement général comportant une onde positive aval se rapprochant beaucoup dans sa création d'une onde pure de translation.

On peut remarquer que l'accord entre les résultats de FAVRE et ceux de nos essais est meilleur dans l'écoulement sur fond rugueux (pl. 86). On peut supposer que la rugosité caractérisant ces essais provoque la stabilisation des ondes de FAVRE à une abscisse relative inférieure à celle nécessaire sur fond lisse.

CONCLUSIONS

L'écoulement variable accompagnant la vidange brusque d'une retenue constitue un cas particulièrement intéressant tant des points de vue théorique que pratique des écoulements non permanents. Sous sa forme générale, le problème n'a reçu aucune solution théorique. La plupart des méthodes de calcul reposent sur l'intégration des équations des écoulements graduellement variables établies par BARRÉ DE SAINT-VENANT. Déjà, dans l'établissement de ces équations, figure le caractère graduel du mouvement, ce qui exclue leur application rigoureuse aux écoulements comportant, par exemple, des ondes à fronts raides ou se propageant dans un lit présentant des singularités. Toutefois, l'écoulement limité par un front raide d'amplitude finie peut recevoir une solution théorique en cherchant l'état du front par propagation d'ondes élémentaires sur le corps de l'onde finie. De plus, la complexité des conditions aux limites rend leur intégration analytique en général impossible.

Mettant de côté les difficultés d'intégration analytique que l'on peut lever grâce à l'utilisation des méthodes graphiques ou mieux numériques, dont l'application est favorisée par le développement des calculatrices, on s'est attaché à vérifier la validité des équations de SAINT-VENANT dans des écoulements sortant du cadre des hypothèses qu'elles admettent. Sans envisager les singularités géométriques du lit de l'écoulement, il est intéressant de savoir dans quelle mesure la lâchure brusque d'une retenue reste admissible. En outre, les ondes à fronts raides qui prennent naissance lorsque la lâchure se fait sur un tirant d'eau initial n'ont fait l'objet d'aucune expérimentation portant sur leur évolution pendant des temps longs. Il est souhaitable d'en faire l'analyse sous forme d'une théorie simplifiée et sous forme expérimentale.

L'étude est à caractère surtout expérimental. Elle est conduite dans un canal prismatique de section rectangulaire dans lequel une vanne à levée rapide lâche brusquement l'eau retenue derrière elle.

L'influence de la pente n'a pas été prise en considération; le fond du canal est horizontal.

Les paramètres dont l'influence est étudiée sont :

- la rugosité du fond du canal;
- le rapport existant initialement entre la profondeur initiale à l'aval de la vanne et celle de la retenue.

Des études analogues ont déjà été conduites dans d'autres laboratoires, mais n'envisageaient pas l'influence du deuxième paramètre précité.

La méthode expérimentale repose sur l'emploi d'une technique de photographie automatique présentant l'intérêt de ne perturber aucunement les phénomènes observés et de donner des indications précises sur les lignes d'eau instantanées. Les mesures portent sur les profondeurs et les vitesses superficielles instantanées. De ces mesures directes, découlent la détermination des vitesses moyennes instantanées et la connaissance qualitative des profils de vitesse.

Deux séries d'essais ont été effectuées ne différant entre elles que par la nature du fond du canal. La détermination des coefficients de perte de charge en écoulements permanents a montré que le fond correspondant à la première série d'essais se comportait comme hydrauliquement lisse, les résultats s'accordant correctement avec la loi de perte de charge en conduite pour le régime turbulent lisse.

Au contraire, le fond relatif à la deuxième série d'essais, rendu artificiellement rugueux, fait apparaître un coefficient de perte de charge de l'ordre de dix fois supérieur. La nature composite des parois du canal dont le fond seul est rugueux, se traduit par le fait que l'écoulement n'apparaît pas absolument turbulent rugueux; il subsiste une influence du nombre de Reynolds.

Tous les résultats de mesure ont fait l'objet de présentation adimensionnelle, ce qui facilite leur interprétation et leur comparaison avec d'autres résultats.

En l'absence de tirant d'eau initial à l'aval de la vanne, les résultats obtenus sont tout à fait comparables à ceux trouvés par le physicien américain R. F. DRESSLER.

Ils constituent une confirmation supplémentaire de la validité des équations de SAINT-VENANT dans cette application. Ils montrent également l'influence de la rugosité du fond, notamment dans la région du front aval de l'écoulement.

Cette influence se traduit par une réduction de la vitesse de ce front accompagnée d'une surélévation.

Les essais effectués en présence d'un tirant d'eau initial à l'aval de la vanne confirment la naissance et la propagation d'une onde à front raide dont l'amplitude dépend du rapport existant entre la profondeur de la retenue et le tirant d'eau initial aval.

Une théorie simplifiée de ce type d'écoulement, qui néglige l'influence des frottements et suppose la pente nulle, donne des résultats en concordance d'autant meilleure avec l'expérimentation que le tirant d'eau initial aval est plus élevé; ceci résulte de la diminution des vitesses correspondantes, donc des pertes de charge. Le principal résultat se trouve être la quasi-constance de la célérité moyenne du front aval, qu'il se déplace sur fond sec ou qu'il se propage sur des tirants d'eau quelconques. Il n'en est pas de même de la vitesse de l'eau.

La comparaison entre les vitesses de surface, déterminée par chronophotographie et la vitesse moyenne en chaque section, donne une indication sur la forme des profils de vitesse. On constate qu'en amont de la section de la vanne, la vitesse de surface est légèrement inférieure à la vitesse moyenne, alors qu'elle devient d'autant plus supérieure à cette dernière que l'on s'éloigne vers l'aval.

Les observations ont notamment porté sur les phénomènes locaux ou passagers qui se superposent à l'écoulement d'ensemble lorsqu'il y a tirant d'eau initial aval. On note, en particulier, une surélévation locale importante au proche aval de la vanne qui a déjà été mise en évidence par L. LÉVIN; d'autre part, le front de l'onde est suivi des ondulations étudiées antérieurement dans des conditions différentes par FAVRE et auxquelles il a laissé son nom. Ces phénomènes locaux revêtent une importance considérable, leur amplitude pouvant accroître de moitié la surélévation due à l'écoulement moyen.

ANNEXE I

TABLEAUX DE RÉSULTATS

TABLEAU I

Essai 1 B

S 1		S 2		S 3		S 4		S 5		S 6		S 7		S 8		S 9		S 10	
<i>t</i>	<i>h</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>t</i>	<i>h</i>
10,60	227	7,66	230	4,60	229	0,98	231	0,15	20	1,79	18	3,29	10	5,55	14	8,70	1	12,80	10
10,80	225	8,02	226	4,79	228	1,19	230	0,36	55	1,99	21	3,61	19	5,78	17	8,88	11	13,02	17
10,98	224	8,24	222	5,00	225	1,39	229	0,57	69	2,19	34	3,78	24	6,00	24	9,08	17	13,22	21
11,16	222	8,44	220	5,20	222	1,61	226	0,78	79	2,40	36	3,98	27	6,20	27	9,26	22	13,42	22
11,39	221	8,66	218	5,38	218	1,80	223	0,98	87	2,60	41	4,19	30	6,41	30	9,46	25	13,62	25
11,69	220	8,86	216	5,60	214	2,02	217	1,21	91	2,78	46	4,39	36	6,61	34	9,70	26	13,83	27
11,80	218	9,04	212	5,79	211	2,24	210	1,40	93	2,95	48	4,60	38	6,82	33	9,90	28	14,04	28
12,00	216	9,24	209	5,99	207	2,46	202	1,63	94	3,18	51	4,82	39	7,05	38	10,10	30	14,24	31
12,21	212	9,66	205	6,21	204	2,66	193	1,82	95	3,37	52	5,02	40	7,28	39	10,30	34	14,42	32
12,60	210	9,86	202	6,41	200	3,10	182	2,01	97	3,56	55	5,22	43	7,50	40	10,50	35	14,63	35
13,01	205	10,08	200	6,60	198	3,41	173	2,21	99	3,76	57	5,42	45	7,70	41	10,68	37	14,82	36
13,42	202	10,32	197	6,80	194	3,79	166	2,43	101	3,98	60	5,61	45	7,86	44	10,86	39	15,02	37
13,84	199	10,56	195	7,00	190	4,00	162	2,63	99	4,16	62	5,82	48	8,09	45	11,09	39	15,21	39
14,22	197	10,90	192	7,39	186	4,35	157	2,86	101	4,36	64	6,02	50	8,31	46	11,31	43	15,45	40
14,64	193	11,18	190	7,81	182	4,74	151	3,08	101	4,54	64	6,22	52	8,50	48	11,50	44	15,65	42
15,08	189	11,36	187	8,20	178	5,14	148	3,28	102	4,78	65	6,44	53	8,74	50	11,70	46		
15,46	188	11,59	185	8,60	174	5,80	143	3,49	102	5,16	68	6,64	54	8,96	54	11,90	47		
		11,98	182	9,00	170	6,24	140	3,70	102	5,36	70	6,84	58	9,20	55	12,11	48		
		12,40	178	9,21	168	6,86	138	4,10	102	5,58	75	7,24	59	9,56	59	12,30	49		

12,82	177	9,79	164	7,12	136	4,50	103	6,00	76	7,85	60	9,97	61	12,51	51
13,22	173	10,20	162	7,49	134	4,92	104	6,34	76	8,24	61	10,40	62	12,71	51
13,64	171	10,60	160	7,92	133	5,34	104	6,74	79	8,64	66	10,80	63	12,92	53
14,08	169	11,00	159	8,72	131	5,79	105	7,13	82	9,02	70	11,20	64	13,12	55
14,44	167	11,39	156	9,15	130	6,20	104	7,52	82	9,44	70	11,60	65	13,50	55
14,86	165	11,78	154	9,83	129	6,60	104	7,92	84	9,84	72	12,02	67	13,90	59
		12,18	152	10,40	127	7,02	104	8,32	86	10,25	73	12,41	69	14,30	63
		12,60	152	11,06	127	7,46	106	8,71	86	10,64	74	12,84	71	14,71	65
		13,00	150	12,24	126	7,88	107	9,08	88	11,02	76			15,06	65
		13,39	148	13,44	125	8,30	106	9,48	90	11,42	77			15,46	66
		13,80	147	14,04	124	8,71	106	9,89	90	11,83	78				
		14,22	146	14,90	122	9,18	104	10,29	92	12,24	78				
		14,62	145			9,57	105	10,69	92	12,64	79				
		15,02	144			10,00	105	11,07	95	13,03	80				
		15,42	143			10,40	105	11,49	96	13,43	80				
						10,80	105	11,91	97	13,84	80				
						11,20	102	12,30	97	14,24	82				
						11,61	103	12,71	98	14,64	84				
						12,01	103	13,52	98	15,04	85				
						12,42	103	13,92	98	15,49	85				
						12,83	102	14,32	99	15,84	86				
						13,25	103	14,72	99						
						14,26	103	15,49	99						
						14,88	106								

TABLEAU II

Essai 2 B

S 1		S 2		S 3		S 4		S 5		S 6		S 7		S 8		S 9		S 10	
t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h
10,40	230	7,79	226	4,58	229	0,89	230	—0,17	7	1,36	5	3,15	5	5,31	3	8,14	2	11,54	3
10,60	229	7,96	224	4,79	226	1,36	229	0,6	7	1,59	5	3,35	5	5,51	3	8,31	2	11,73	3
10,80	228	8,17	222	4,96	224	1,66	226	0,26	50	1,79	5	3,54	5	5,71	2	8,52	2	11,90	3
10,98	224	12,41	176	5,20	220	1,87	223	0,47	65	1,98	45	3,76	39	5,92	36	8,74	11	12,12	3
11,20	223	12,81	174	5,40	218	2,14	214	0,65	70	2,19	53	3,98	43	6,18	36	8,95	22	13,30	10
11,39	221	13,19	172	5,61	214	2,38	207	0,86	81	2,41	53	4,20	43	6,26	37	9,16	30	12,50	29
11,60	220	13,59	171	5,81	210	2,66	193	1,06	88	2,60	55	4,41	49	6,55	36	9,35	32	12,71	29
11,80	216	13,97	168	6,02	208	2,97	185	1,27	92	2,80	50	4,58	48	6,78	40	9,58	34	12,91	30
12,01	215	14,52	166	6,22	203	3,38	174	1,49	94	2,87	55	4,78	50	7,01	41	9,79	35	13,10	34
12,21	214			6,42	200	3,75	166	1,70	95	3,18	55	4,98	51	7,2	42	10,00	35	13,30	36
12,42	212			6,62	196	3,99	163	1,90	95	3,38	56	5,20	54	7,43	46	10,18	40	13,53	36
12,62	210			6,82	194	4,32	158	2,10	98	3,60	58	5,40	55	7,64	51	10,36	40	13,72	36
12,82	208			7,04	190	4,74	153	2,30	99	3,80	61	5,62	54	7,88	53	10,59	41	13,92	38
13,02	207			7,24	188	5,18	148	2,49	99	4,01	63	5,83	57	8,04	58	10,77	45	14,12	38
13,22	205			7,43	185	5,96	141	2,70	100	4,20	63	6,04	58	8,25	56	10,99	44	14,32	39
13,48	204			7,62	182	6,40	140	2,92	100	4,40	64	6,24	61	8,48	60	11,21	45	14,55	43
13,66	202			7,83	180	6,80	138	3,12	100	4,60	67	6,43	61	8,70	60	11,41	47		
13,86	200			8,23	178	7,20	137	3,34	101	4,80	68	6,63	60	8,82	62	11,59	49		
14,07	198			8,65	173	7,62	136	3,54	102	5,00	69	7,03	63	9,15	63	11,79	51		
14,40	198			9,26	168	8,02	133	3,74	103	5,40	70	7,30	64	9,46	64	11,99	52		

9,99	104	9,99	104	9,99	104	9,99	74	7,93	63	9,98	64	12,18	52
10,06	162	8,85	130	4,37	104	6,39	76	8,05	68	9,84	62	12,39	53
10,42	160	9,30	129	4,78	104	6,80	78	8,42	72	10,19	62	12,82	53
10,82	158	9,95	130	5,15	105	7,20	80	8,86	74	10,42	62	13,20	57
11,21	157	10,34	129	5,57	107	7,58	82	9,40	74	10,82	62	13,58	51
11,63	154	10,85	128	6,0	106	7,98	84	9,70	73	11,11	62	13,96	64
12,05	153	11,30	129	6,40	106	8,38	88	10,11	75	11,62	63	14,36	65
		11,42	128	6,80	106	8,74	88	10,50	75	12,05	65		
		12,01	127	7,12	106	9,15	89	10,82	76	12,45	69		
		12,50	127	7,66	107	9,59	90	11,14	78	12,85	69		
		12,84	126	8,05	107	10,00	90	11,70	79	13,30	71		
		13,28	127	8,47	106	10,36	94	12,10	80	13,70	72		
		13,76	127	8,89	107	10,80	92	12,50	80	14,10	74		
		14,16	126	9,31	107	11,20	94	12,92	82	14,50	80		
				9,74	106	11,60	96	13,36	83				
				10,12	106	12,00	94	13,72	85				
				10,56	105	12,40	95	14,11	86				
				10,95	105	12,80	96	14,50	88				
				11,34	107	13,20	98						
				11,76	106	13,60	99						
				12,16	103	13,98	99						
				12,56	104								
				12,94	104								
				13,36	106								
				13,75	105								

TABLEAU III

Essai 3 B

S 1		S 2		S 3		S 4		S 5		S 6		S 7		S 8		S 9		S 10	
t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h
10,70	227	7,82	226	4,56	228	1,01	229	-0,04	10	1,24	10	3,22	10	5,31	9	8,63	9	11,88	8
10,90	227	8,01	225	4,74	227	1,22	229	0,14	53	1,59	10	3,58	10	5,51	9	8,81	9	12,10	8
11,11	226	8,23	222	4,94	226	1,42	229	0,34	69	1,83	10	3,75	10	5,70	9	9,00	9	12,30	8
11,30	225	8,43	219	5,12	223	1,64	228	0,55	79	2,04	51	3,94	36	5,90	9	9,22	40	12,45	8
11,51	223	8,82	215	5,34	221	1,80	225	0,74	84	2,26	62	4,16	64	6,12	10	9,44	48	12,65	11
11,72	220	9,03	212	5,54	217	2,01	220	0,97	88	2,46	63	4,37	61	6,33	52	9,76	49	12,91	44
11,92	219	9,23	209	5,91	211	2,22	214	1,17	91	2,68	63	4,56	61	6,52	56	9,86	50	13,11	48
12,12	218	9,44	210	6,30	203	2,44	206	1,37	93	2,89	73	4,75	65	6,72	58	10,05	54	13,28	49
12,32	215	9,63	205	6,70	196	2,63	197	1,60	95	3,09	70	4,97	65	6,93	61	10,26	52	13,49	50
12,52	213	9,82	202	7,08	191	2,83	191	1,80	97	3,30	68	5,17	64	7,17	62	10,47	54	13,66	50
12,72	212	10,05	200	7,44	187	3,03	184	2,00	96	3,51	72	5,37	65	7,38	63	10,67	55	13,83	50
12,92	210	10,31	197	7,83	182	3,23	178	2,20	96	3,70	71	5,58	66	7,60	60	10,91	55	14,02	52
13,14	208	10,68	194	8,26	177	3,46	173	2,40	98	3,93	71	5,75	66	7,82	64	11,03	58	14,22	55
13,31	206	10,92	192	8,64	173	3,65	167	2,62	99	4,12	73	5,91	66	8,03	63	11,32	59	14,40	58
13,54	205	11,15	190	8,98	169	3,87	165	2,83	100	4,32	74	6,13	69	8,21	61	11,57	61	14,60	59
13,74	202	11,35	188	9,40	166	4,06	161	3,25	101	4,54	75	6,50	70	8,43	64	11,77	63	14,80	59
14,15	200	11,55	185	9,81	163	4,35	157	3,66	102	4,73	76	6,70	73	8,65	61	11,97	65	15,00	60
14,34	198	11,75	183	10,17	161	4,55	155	4,05	102	4,94	75	6,91	72	8,86	58	12,18	64		
14,55	197	11,96	183	10,55	159	4,94	151	4,48	102	5,18	76	7,28	75	9,08	60	12,39	63		

14,00	137	12,04	175	10,53	155	9,39	141	4,88	103	9,57	75	4,86	73	9,29	62	12,62	68
		13,21	175	11,25	157	5,81	143	5,30	108	5,57	75	8,25	75	9,49	63	12,82	65
		13,61	172	11,72	155	6,21	141	5,70	107	5,79	79	8,65	76	9,70	68	13,03	65
		14,05	170	12,13	153	6,59	138	6,13	105	6,20	80	9,04	78	9,90	68	13,15	65
		14,42	169	12,51	152	6,95	136	6,55	107	6,60	80	9,41	79	10,31	69	13,62	67
		14,82	169	12,92	151	7,41	136	6,95	104	7,02	82	9,81	80	10,74	72	14,04	65
				13,26	149	7,82	136	7,38	107	7,38	84	10,20	79	11,11	73		
				13,65	148	8,25	135	7,81	105	7,79	84	10,56	79	11,76	75		
				14,04	158	8,65	133	8,21	107	8,19	89	10,99	81	12,35	77		
				14,40	157	9,08	132	8,62	107	8,63	89	11,37	81	12,95	80		
				14,81	154	9,48	132	9,10	106	9,02	91	11,75	83	13,16	82		
						9,90	130	9,49	105	9,43	90	12,12	83	13,56	80		
						10,30	130	9,90	105	9,84	91	12,53	84	13,97	82		
						10,66	129	10,31	105	10,26	90	12,95	87	14,37	82		
						11,12	129	10,72	105	10,65	95	13,29	87				
						11,46	128	11,12	105	11,12	96	13,63	88				
						11,84	127	11,53	105	11,53	96	13,97	89				
						12,33	125	11,94	105	11,94	98	14,33	90				
						12,87	125	12,38	105	12,38	98	14,73	88				
						13,21	125	12,72	103	13,20	98	15,03	90				
						13,63	125	13,14	105	13,61	98						
						14,20	123	13,56	104	14,00	99						
						15,90	123	13,96	104								
						15,25	123	14,36	106								

TABLEAU IV

Essai 4 B

S 1		S 2		S 3		S 4		S 5		S 6		S 7		S 8		S 9		S 10	
t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h
10,70	228	7,71	226	4,35	229	1,20	229	-0,12	20	2,00	20	2,96	20	5,56	20	8,26	20	12,60	20
11,04	227	7,90	223	4,69	226	1,42	228	0,06	20	2,20	23	3,18	20	5,76	19	8,48	20	12,80	20
11,22	225	8,10	222	4,87	225	1,73	227	0,26	97	2,39	75	3,35	20	5,96	19	8,66	20	13,00	65
11,40	224	8,30	218	5,08	223	2,01	218	0,45	73	2,59	85	3,54	20	6,16	19	8,84	20	13,20	68
11,60	222	8,50	218	5,27	220	2,20	214	0,66	80	2,79	82	3,74	20	6,26	19	9,04	20	13,42	71
11,80	220	8,70	214	5,50	218	2,54	202	0,86	92	3,00	90	3,95	20	6,50	63	9,23	20	13,62	70
12,01	219	8,91	212	5,66	214	2,80	192	1,30	96	3,21	87	4,16	25	6,70	74	9,49	55	13,82	72
12,20	217	9,12	210	5,85	209	3,20	180	1,65	95	3,40	85	4,34	71	6,90	73	9,69	69	14,03	70
12,40	212	9,30	208	6,08	206	3,40	174	1,84	96	3,60	85	4,56	79	7,10	78	9,88	74	14,20	73
12,60	212	9,50	207	6,27	203	3,70	165	2,04	98	3,80	83	4,76	77	7,30	76	10,08	75	14,43	71
12,80	210	9,70	203	6,45	199	3,91	163	2,22	100	4,00	88	4,91	80	7,49	78	10,29	75	14,62	72
13,00	208	9,86	201	6,68	196	4,20	160	2,42	98	4,20	90	5,10	78	7,68	77	10,49	75	14,82	72
13,20	207	10,03	199	6,89	195	4,74	154	2,61	99	4,39	91	5,30	81	7,90	76	10,66	76	15,00	72
13,42	206	10,23	195	7,10	192	5,14	146	2,82	100	4,61	89	5,51	81	8,08	80	10,85	77	15,24	70
13,62	203	10,45	193	7,30	190	5,57	143	3,14	100	4,90	90	5,62	80	8,28	81	11,05	77	15,46	74
13,82	201	10,87	188	7,50	187	5,95	141	3,63	102	5,20	90	5,92	84	8,49	82	11,28	78	15,63	77
14,20	200	11,25	187	7,70	193	6,34	138	4,03	103	5,40	91	6,30	81	8,69	82	11,49	78	15,84	75
14,60	197	11,65	184	7,88	182	6,72	136	4,40	104	5,96	92	6,51	83	8,90	83	11,70	79		
15,03	192	12,25	179	8,06	180	7,10	135	4,82	103	6,36	94	6,90	84	9,10	82	11,90	80		
15,40	189	12,61	177	8,47	177	7,51	133	5,20	103	6,70	95	7,11	84	9,31	82	12,10	80		

15,80	187	13,01	172	8,84	173	7,89	132	5,60	104	7,11	96	7,70	84	9,53	82	12,28	79
		13,21	170	9,11	168	8,49	131	6,00	104	7,34	97	8,09	85	9,84	81	12,47	78
		13,76	168	9,62	166	9,02	130	6,40	105	7,90	96	8,49	85	10,24	84	12,60	80
		14,11	166	10,08	163	9,38	129	6,79	105	8,30	97	8,86	86	10,63	86	12,87	80
		14,41	165	10,48	161	9,76	128	7,14	106	8,71	98	9,23	87	11,07	87	13,30	85
		14,91	163	10,90	158	10,18	128	7,35	106	9,06	97	9,62	88	11,45	88	13,67	85
				11,26	157	10,36	126	7,96	105	9,58	98	10,10	88	11,84	89	14,04	86
				11,71	156	11,01	125	8,30	104	9,90	99	10,49	88	12,24	92	14,43	84
				12,09	154	11,40	124	8,70	105	10,40	99	10,90	90	12,61	92		
				12,48	153	11,67	124	9,09	104	10,70	101	11,30	91	13,00	92		
				12,88	150	12,05	125	9,48	103	11,10	100	11,70	92	13,40	92		
				13,29	149	12,70	125	9,85	102	11,50	101	12,08	93	13,80	92		
				13,70	148	13,10	124	10,30	103	11,91	102	12,42	94	14,16	93		
				14,08	147	13,79	125	10,69	103	12,30	102	12,83	95	14,57	91		
				14,49	146	14,16	125	11,04	103	12,69	102	13,27	95	14,97	92		
				14,84	146	14,81	124	11,40	104	13,04	102	13,64	95				
						15,80	124	11,82	103	13,44	103	14,04	96				
								12,24	104	13,76	104	14,43	97				
								12,61	104	14,14	104	14,83	98				
								13,00	106	14,58	105						
								13,41	103	14,97	105						
								13,81	103								
								14,20	105								
								14,60	104								
								15,04	105								

TABLEAU V

Essai 5 B

S 1		S 2		S 3		S 4		S 5		S 6		S 7		S 8		S 9		S 10	
t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h
10,74	228	7,80	228	4,68	228	1,03	230	0,20	40	1,06	40	2,54	40	5,80	40	9,03	40	12,50	40
10,95	226	8,00	226	4,98	227	1,26	229	0,40	110	1,28	40	2,82	40	6,01	40	9,24	40	12,73	40
11,14	225	8,20	222	5,18	224	1,54	229	0,60	96	1,46	40	3,06	40	6,23	40	9,44	40	12,84	40
11,35	224	8,40	220	5,40	220	1,73	228	0,80	94	1,46	40	3,27	40	6,43	40	9,70	40	13,14	40
11,54	221	8,60	217	5,58	216	2,03	227	1,00	94	1,66	40	3,45	40	6,66	70	9,90	70	13,35	40
11,73	220	8,81	213	5,80	214	2,39	218	1,20	100	1,82	40	3,64	40	6,88	99	10,12	95	13,56	76
11,94	217	9,01	210	6,19	204	2,70	208	1,40	100	2,06	40	3,84	40	7,08	95	10,22	98	13,78	94
12,15	216	9,22	211	6,58	198	3,03	198	1,62	102	2,31	100	4,02	40	7,29	101	10,54	102	13,96	95
12,35	213	9,40	207	7,00	192	3,18	191	1,82	103	2,52	105	4,30	40	7,49	102	10,76	102	14,14	97
12,57	210	9,62	204	7,40	186	3,39	184	2,05	104	2,76	106	4,50	90	7,70	103	10,92	104	14,33	97
12,95	207	9,80	201	7,80	182	3,62	180	2,24	105	2,98	108	4,66	100	7,94	101	11,14	102	14,55	97
13,16	206	10,03	200	8,20	176	3,81	176	2,44	104	3,18	107	4,87	106	8,13	103	11,38	102	14,73	100
13,34	204	10,27	197	8,60	173	4,02	170	2,65	105	3,38	113	5,07	103	8,30	100	11,60	104	14,95	101
13,75	200	10,48	194	9,00	171	4,13	165	2,82	107	3,56	108	5,28	107	8,51	104	11,80	103		
13,97	198	10,70	193	9,59	167	4,58	158	3,04	108	3,77	110	5,66	104	8,70	104	12,00	102		
14,20	197	10,90	190	9,98	164	4,78	159	3,25	108	3,97	109	5,87	105	8,94	104	12,20	102		
14,58	193	11,11	189	10,40	161	5,01	156	3,44	109	4,17	110	6,27	106	9,13	102	12,43	100		
15,00	191	11,32	187	10,76	158	5,51	153	3,64	109	4,40	112	6,45	105	9,36	102	12,62	102		
		11,52	186	11,15	156	5,88	152	3,86	111	4,60	112	6,65	107	9,56	105	12,83	104		
		11,76	184	11,53	156	6,24	148	4,09	112	4,80	113	6,86	108	9,76	102	13,04	103		

12,16	180	11,96	157	6,71	144	5,41	112	5,00	110	7,26	110	9,96	104	13,25	102
12,80	175	12,30	154	7,24	140	6,04	113	5,20	110	7,66	108	10,16	106	13,44	102
13,20	174	12,72	151	7,61	138	6,44	114	5,40	110	8,02	108	10,54	105	13,63	104
13,60	171	13,13	151	8,00	136	6,84	114	5,82	112	8,43	108	11,00	104	14,02	104
14,03	168	13,60	147	8,40	135	7,24	114	6,20	111	8,84	111	11,40	106	14,44	102
14,40	166	13,99	147	8,81	134	7,70	114	6,62	110	9,24	108	11,80	106	14,84	101
14,80	166	14,36	145	9,21	133	8,07	114	7,05	110	9,60	110	12,20	106		
				9,71	132	8,50	115	7,44	110	10,00	112	12,60	107		
				10,00	130	8,90	116	7,84	110	10,40	110	13,00	110		
				10,39	131	9,35	115	8,24	112	10,80	111	13,40	114		
				11,06	130	9,70	120	8,65	112	11,18	112	13,80	114		
				11,50	130	10,16	120	9,04	112	11,57	112	14,22	111		
				11,92	131	10,62	120	9,44	114	11,96	113	14,62	111		
				12,29	126	11,03	120	9,90	114	12,36	115				
				12,67	127	11,43	125	10,30	116	12,76	113				
				13,09	127	11,80	120	10,70	114	13,19	113				
				13,62	126	12,20	124	11,13	115	13,58	112				
				14,04	126	12,60	121	11,55	115	14,00	114				
				14,64	126	13,02	120	11,99	114						
						13,42	120	12,36	113						
						13,85	121	12,80	113						
						14,27	123	13,24	111						
						14,66	123	13,62	113						
								14,04	112						
								14,44	114						
								14,86	115						

TABLEAU VI

Essai 6 B

S 1		S 2		S 3		S 4		S 5		S 6		S 7		S 8		S 9		S 10	
t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h
10,73	229	7,64	227	4,60	229	1,04	229	-0,10	80	1,55	80	3,80	80	5,82	82	9,29	80		
10,89	226	7,84	225	4,80	228	1,40	230	0,10	80	1,72	80	4,01	80	6,20	80	9,48	80		
11,14	224	8,04	221	5,02	225	1,60	230	0,30	174	2,12	84	4,22	80	6,42	80	9,68	80		
11,32	222	8,44	217	5,22	222	1,72	225	0,52	135	2,36	142	4,46	130	6,59	136	9,90	100		
11,69	220	8,64	214	5,44	216	1,92	222	0,74	147	2,59	145	4,65	134	6,80	132	10,08	138		
12,44	212	8,80	210	5,65	210	2,14	219	0,93	145	2,77	141	4,85	139	7,00	134	10,30	136		
12,64	210	9,00	209	5,86	209	2,34	208	1,10	145	2,97	142	5,04	139	7,25	135	10,50	140		
12,83	208	9,10	206	6,08	206	2,55	199	1,31	140	3,19	143	5,24	144	7,46	135	10,70	135		
13,14	204	9,24	202	6,30	202	2,75	191	1,55	140	3,38	141	5,46	138	7,64	139	10,90	140		
13,26	204	9,64	200	6,48	199	2,93	188	1,76	139	3,60	143	5,67	137	7,82	138	11,10	136		
13,67	201	10,05	198	6,69	195	3,14	181	1,96	138	3,80	145	5,91	143	7,99	136	11,30	137		
14,04	199	10,26	195	6,90	192	3,37	173	2,18	142	4,00	141	6,13	138	8,19	139	11,52	135		
14,22	196	10,46	193	7,10	189	3,57	169	2,39	148	4,24	144	6,31	139	8,40	136	11,74	137		
14,84	193	10,69	190	7,33	185	3,80	165	2,60	146	4,65	141	6,50	139	8,60	138	11,94	139		
		10,86	189	7,56	183	4,00	162	2,78	149	4,85	139	6,70	142	8,79	139	12,16	139		
		11,08	186	7,77	182	4,35	158	2,98	143	5,04	143	6,95	140	8,99	136	12,38	139		
		11,29	184	7,95	179	4,70	152	3,18	139	5,25	140	7,16	139	9,19	136	12,57	136		
		11,50	183	8,06	176	5,20	147	3,40	140	5,45	139	7,37	137	9,40	138	12,80	139		
		11,64	181	8,55	171	6,10	143	3,60	137	5,69	142	7,58	140	9,55	138	13,00	138		
		11,90	180	9,00	170	6,64	144	3,80	140	5,90	140	7,77	138	9,74	138	13,20	138		
		12,29	177	9,39	165	7,33	146	4,21	134	6,13	142	8,13	140	10,00	139	13,40	138		
		12,76	174	10,18	163	7,80	152	4,61	137	6,54	140	8,56	140	10,46	136	13,60	140		

13,09	172	10,68	160	8,19	149	5,01	144	6,95	143	9,00	140	10,76	141	13,99	139
13,60	170	10,97	158	8,65	146	5,43	141	7,38	140	9,40	141	11,15	140	14,40	139
14,00	166	11,31	156	9,04	145	5,81	147	7,78	140	9,76	139	11,56	139	14,80	140
14,39	165	11,77	155	9,48	148	6,25	149	8,18	141	10,20	140	11,94	139		
14,89	162	12,16	154	9,84	152	6,64	143	8,60	142	10,62	143	12,20	138		
		12,56	152	10,22	150	7,05	146	9,03	143	11,00	142	12,60	138		
		12,97	150	10,67	148	7,46	145	9,38	142	11,40	142	13,10	140		
		13,38	151	11,09	148	7,84	145	9,76	143	11,78	142	13,50	140		
		13,80	149	11,46	150	8,23	147	10,20	141	12,20	142	13,90	140		
		14,10	149	12,00	153	8,61	146	10,42	141	12,60	142	14,25	138		
		14,60	149	12,45	151	9,02	143	11,00	145	12,95	142	14,65	140		
				12,80	150	9,43	146	11,40	144	13,40	141	15,02	140		
				13,34	152	9,83	148	11,76	143	13,80	142				
				13,79	149	10,26	145	12,20	143	14,20	143				
				14,18	151	10,70	146	12,60	143	14,61	143				
				14,59	153	11,00	146	12,96	142						
						11,50	146	13,40	142						
						11,90	145	13,80	142						
						12,31	144	14,21	145						
						12,80	146	14,60	146						
						13,20	148								
						13,60	146								
						14,00	146								
						14,42	149								
						14,80	145								

TABLEAU VII

Essai 7 B

S 1			S 2			S 3			S 5			S 6			S 7			S 8			S 9			S 10		
t	h		t	h		t	h		t	h		t	h		t	h		t	h		t	h		t	h	
10,68	228		8,18	228		6,94	229		-0,10	162		1,72	160		3,73	169		5,76	158		9,04	158				
10,96	228		8,46	224		1,26	228		6,62	158		1,93	161		4,10	169		5,90	158		9,18	160				
11,16	228		8,66	226		1,51	229		6,39	181		2,16	164		4,30	166		6,16	159		9,38	160				
11,32	225		8,72	218		1,84	225		6,56	196		2,36	176		4,52	182		6,28	159		9,58	168				
11,52	224		8,92	217		2,05	221		6,72	193		2,53	205		4,78	210		6,56	164		9,82	198				
11,72	221		9,14	215		2,16	215		6,96	195		2,80	193		4,96	188		6,92	178		10,00	204				
12,00	219		9,37	211		6,05	207		1,12	194		3,02	178		5,20	175		6,90	206		10,20	175				
12,26	217		9,57	206		6,24	204		1,32	198		3,26	196		5,40	190		7,10	194		10,42	169				
12,46	216		9,80	204		6,46	202		1,51	196		3,45	195		5,60	202		7,30	172		10,62	188				
12,68	212		10,01	201		6,65	196		1,71	195		3,64	182		5,80	184		7,50	174		10,85	204				
12,88	210		10,20	198		6,85	194		1,95	194		3,87	199		6,01	187		7,70	196		11,08	181				
13,42	207		11,41	197		7,11	192		2,15	193		4,09	183		6,25	198		7,91	196		11,29	174				
13,68	204		10,64	194		7,31	191		2,25	195		4,30	198		6,51	186		8,10	178		11,49	192				
14,08	203		10,85	194		7,50	191		2,47	193		4,52	185		6,68	190		8,33	182		11,70	198				
			11,06	193		7,76	191		2,66	194		4,76	196		6,88	197		8,54	195		11,90	180				
			11,28	192		7,98	192		2,84	190		4,98	187		7,10	185		8,72	192		12,14	181				
			11,50	190		8,20	194		3,03	195		5,18	190		7,33	195		8,94	181		12,35	194				
			11,70	190		8,40	195		3,25	190		5,38	191		7,54	187		9,13	189		12,57	188				
			11,90	190		8,60	197		3,46	193		5,59	193		7,76	190		9,34	195		12,80	181				
			12,12	190		8,80	198		3,65	192		5,79	190		8,00	194		9,54	183		13,00	190				
			12,32	191		9,24	194		4,06	194		6,04	191		8,20	186		9,74	187		13,20	193				
			12,60	194		9,63	194		4,45	191		6,29	191		8,40	194		9,94	195		13,40	183				

13,00	194	10,05	195	7,56	193	4,84	195	6,72	191	8,80	194	10,14	185	13,82	194
13,40	196	10,50	195	8,10	195	5,27	190	7,13	192	9,25	194	10,32	194	14,25	188
13,80	194	10,98	196	8,52	191	5,66	193	7,58	191	9,66	193	10,92	189	14,50	189
14,30	192	11,34	196	9,28	193	6,04	190	8,00	191	10,10	191	11,17	184		
14,70	192	11,74	192	9,82	196	6,44	193	8,42	192	10,52	191	11,34	188		
		12,17	194	10,41	196	6,85	192	8,83	192	11,14	192	12,09	194		
		12,60	195	10,90	193	7,24	191	9,28	192	11,36	190	12,49	191		
		13,00	192	11,35	196	7,64	191	9,72	191	11,77	190	12,90	188		
		13,40	195	11,78	193	8,04	191	10,12	192	12,20	192	13,30	185		
		13,80	193	12,56	194	8,47	191	10,53	191	12,60	191	13,87	185		
				13,39	194	8,84	191	11,00	191	13,00	192	14,10	186		
				13,86	195	9,26	192	11,39	190	13,40	191	14,50	195		
				14,21	196	9,69	191	11,80	190						
						10,06	192	12,20	190						
						10,44	191	12,63	190						
						10,86	193	13,03	190						
						11,31	192	13,43	190						
						11,71	192	13,86	190						
						12,04	194								
						12,45	190								
						12,86	192								
						13,26	194								
						13,68	193								
						14,06	193								
						14,45	193								

TABLEAU VIII

Essai 8 B

S 1		S 2		S 3		S 4		S 5		S 6		S 7		S 8		S 9		S 10	
t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h
16,04	112	11,70	110	7,08	113	1,78	115	0,18	0	2,36	0	5,54	0	9,40	0	15,10	0	22,18	0
16,24	111	12,10	108	7,28	112	2,16	114	0,38	24	2,60	9	5,99	13	9,64	5	15,59	9	22,74	8
16,38	110	12,34	107	7,50	111	2,54	114	0,60	40	2,80	14	6,40	18	9,88	8	16,00	10	23,18	9
16,60	110	12,54	106	7,70	109	2,90	115	0,84	40	3,20	18	6,84	21	10,08	11	16,40	13	23,59	10
16,84	109	13,10	104	8,12	106	3,36	106	1,04	42	3,64	22	7,24	25	10,28	12	16,80	14	24,00	14
17,04	108	13,50	102	8,54	103	4,08	96	1,28	43	4,04	24	7,68	26	10,52	14	17,20	18	24,40	14
17,24	108	13,94	100	8,94	100	4,48	91	1,46	44	4,44	25	8,10	28	10,72	16	17,60	20	24,88	16
17,44	108	14,30	98	9,40	100	4,88	88	1,70	45	4,80	28	8,30	30	10,92	17	18,04	22	25,28	17
17,64	106	14,74	97	9,80	96	5,28	84	1,94	46	5,20	30	8,96	31	11,18	18	18,44	22	25,70	18
17,84	106	15,20	95	10,24	94	5,48	81	2,14	46	5,68	34	9,36	32	11,30	20	18,84	22	26,08	19
18,01	105	15,60	94	10,64	93	6,10	80	2,34	47	6,14	35	9,78	33	11,56	22	19,28	22	26,48	19
18,20	104	16,00	93	11,04	92	6,58	77	2,54	48	6,56	35	10,20	32	11,80	24	19,70	26		
18,44	104	16,44	92	11,48	90	7,10	76	2,78	49	6,90	35	10,42	33	12,00	24	20,08	26		
18,68	103	17,04	90	11,90	88	7,54	75	2,99	50	7,36	38	11,04	35	12,20	25	20,48	27		
18,90	102	17,20	90	11,39	87	8,30	73	3,19	50	7,78	41	11,44	36	12,44	25	20,84	27		
19,10	101	17,64	89	11,79	85	8,64	72	3,39	49	8,19	41	11,88	38	12,68	25	21,28	29		
19,46	101	18,08	88	13,20	84	9,24	71	3,60	50	8,49	41	12,36	40	13,04	27	21,64	31		
19,94	100	18,28	88	13,60	83	9,79	70	3,84	51	8,98	42	12,76	39	13,50	26	22,10	31		
20,34	99	18,48	88	14,02	82	10,20	69	4,04	50	9,42	41	13,18	40	13,94	28	22,54	31		
20,94	97	18,88	85	14,44	80	10,99	69	4,28	50	9,82	40	13,78	39	14,38	29	22,90	32		
21,39	95	19,28	85	14,88	80	11,28	69	4,66	50	10,20	40	13,98	41	14,68	30	23,30	32		
20,80	94	19,68	84	15,24	80	12,08	68	5,10	50	10,60	43	14,38	42	15,20	31	23,70	33		

21,20	94	20,08	82	15,68	79	12,90	67	5,56	50	11,00	43	14,78	42	15,60	31	24,18	33
21,64	93	20,44	83	16,08	77	13,48	68	5,96	51	11,48	45	15,22	43	16,04	32	24,48	33
23,02	91	20,90	82	16,50	77	14,20	65	6,38	52	11,84	46	15,64	42	16,40	35	24,94	34
		21,28	82	16,98	78	14,80	65	6,78	51	12,04	48	16,04	43	16,80	35	25,30	36
		21,64	80	17,38	77	16,60	65	7,20	51	12,64	49	16,48	45	17,20	34	25,74	36
		22,08	80	17,80	78	17,50	65	7,60	52	13,10	49	16,88	44	17,64	34		
		22,44	80	18,20	75	18,20	65	8,00	52	13,50	47	17,28	45	18,08	34		
		22,88	79	18,60	75	19,00	65	8,44	51	13,90	48	17,70	45	18,28	34		
		23,30	78	19,04	75	20,84	64	8,84	52	14,36	49	18,18	48	18,88	34		
		23,70	77	19,44	75	22,04	63	9,24	52	14,70	49	18,60	48	19,28	36		
		24,10	76	19,82	75	22,54	63	9,74	51	15,18	49	19,00	48	19,70	36		
		24,48	77	20,28	74	23,76	63	10,18	52	15,58	49	19,40	46	20,14	36		
		24,94	77	20,68	74	25,88	64	10,38	51	15,98	49	19,82	46	20,58	37		
		25,78	77	21,10	74			11,00	52	16,40	50	20,22	47	20,99	38		
				21,88	74			11,44	52	16,80	50	20,64	49	21,38	38		
				22,34	73			11,88	53	17,20	51	21,08	49	21,84	38		
				22,98	73			12,24	53	17,60	52	21,50	49	22,24	38		
				23,28	72			12,70	53	18,00	51	21,98	48	22,66	38		
				23,70	72			13,14	54	18,44	51	22,19	48				
				24,10	72			13,54	52	18,86	50	22,80	48				
				24,98	72			14,39	53	19,24	50	23,20	48				
				25,88	72			14,84	53			23,60	48				
								15,20	54			24,08	47				
								15,60	54			24,48	47				
								16,40	54			24,68	47				
								18,58	55			25,30	47				
								18,96	57			25,64	48				
												26,14	48				

TABLEAU IX

Essai I C

S 1		S 2		S 3		S 4		S 5		S 6		S 7		S 8		S 9		S 10	
t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h
10,60	230	6,80	228	4,28	230	1,00	229	0,35	55	1,45	1,00	4,90	1	8,52	1	13,88	0	20,60	1
10,80	226	7,10	227	4,58	228	1,20	229	0,58	70	1,73	1,00	5,20	20	8,81	1	14,17	0	20,90	1
11,05	225	7,38	226	4,90	226	1,68	228	0,84	80	2,00	1,00	5,50	31	9,03	16	14,45	15	21,18	16
11,25	224	7,68	225	5,24	221	1,76	224	1,12	90	2,30	24	5,80	42	9,24	30	14,70	22	21,48	24
11,52	222	8,01	223	5,50	216	2,23	210	1,42	96	2,65	40	6,11	52	9,50	36	14,96	30	21,74	31
11,79	219	8,28	221	5,80	212	2,54	198	1,70	99	2,94	50	6,44	56	9,74	45	15,22	36	22,00	36
12,06	216	8,56	217	6,08	205	2,82	188	1,98	100	3,28	62	6,76	62	10,00	48	15,50	42	22,30	39
12,30	215	8,82	214	6,45	201	3,10	180	2,24	103	3,60	68	7,04	64	10,25	56	15,80	46	22,56	44
12,52	212	9,10	211	6,76	196	3,38	174	2,50	106	3,70	70	7,36	67	10,50	58	16,05	47	22,86	47
12,76	210	9,36	208	7,04	191	3,82	165	2,78	108	4,24	76	7,66	70	10,78	61	16,28	50	23,14	49
13,03	208	9,64	204	7,37	188	4,08	162	3,04	108	4,76	80	7,98	72	11,04	62	16,56	54	23,36	51
13,27	205	9,92	203	7,66	184	4,38	160	3,32	108	4,86	80	8,26	74	11,26	64	16,83	55	23,64	55
13,55	203	10,16	199	7,98	181	4,64	155	3,58	108	5,20	84	8,93	78	11,54	66	17,12	57	23,90	58
13,80	202	10,43	197	8,26	178	4,92	152	3,82	108	5,52	86	9,40	79	11,80	68	17,36	60		
14,07	200	10,68	194	8,54	176	5,21	150	4,08	108	5,83	88	9,94	83	12,05	70	17,64	63		
14,29	199	10,98	192	8,82	173	5,54	147	4,38	110	6,14	92	10,46	85	12,32	71	17,90	65		
14,56	197	11,24	190	9,10	170	5,65	145	4,64	110	6,45	93	11,03	86	12,54	72	18,16	66		
14,82	194	11,53	188	9,40	170	6,14	144	4,92	110	6,77	96	11,50	89	12,78	75	18,70	68		
15,34	191	11,77	185	9,66	168	6,44	143	5,17	110	7,37	98	12,05	90	13,03	78	19,20	72		
15,80	187	12,30	182	9,94	166	7,04	140	5,39	111	7,99	99	12,60	92	13,28	77	19,72	73		
16,30	182	12,59	181	10,20	164	7,66	138	5,70	111	8,55	100	13,12	93	13,82	78	20,34	77		
16,82	178	12,83	180	10,46	164	8,23	135	6,22	112	9,08	101	13,68	95	14,82	83	20,82	78		
17,84	169	13,08	178	10,73	162	8,55	135	6,72	114	9,65	104	14,22	95	15,34	85	21,40	80		

13,86	174	11,27	160	9,75	135	7,73	114	10,68	106	15,28	98	16,86	89	21,92	81
16,02	166	11,50	160	10,26	131	8,22	116	11,23	107	15,82	104	17,32	92	23,00	84
16,55	164	11,78	160	11,03	133	8,74	118	11,75	110	16,34	105	17,82	93	23,55	85
17,10	163	12,30	160	11,51	134	9,26	118	12,29	112	16,85	105	18,35	94		
17,80	165	12,78	160	12,04	134	9,74	118	12,83	113	17,32	106	18,82	95		
18,58	160	13,16	161	12,62	135	10,25	118	13,34	114	17,82	106	19,82	98		
21,40	146	13,80	162	13,12	134	10,80	120	13,67	116	18,35	107	20,33	99		
21,92	144	14,28	163	13,67	135	11,26	120	14,22	116	18,82	108	20,86	101		
22,42	141	14,80	162	14,21	136	11,78	120	14,96	116	19,32	108	21,36	102		
23,00	138	15,35	164	14,71	135	12,30	120	15,50	116	19,82	108	21,86	103		
23,54	136	15,82	165	15,27	135	12,78	120	16,04	117	20,34	108	22,34	103		
		16,32	165	15,82	135	13,26	121	16,56	117	20,86	109	22,88	104		
		16,85	165	16,34	135	13,80	122	17,10	118	21,37	110	23,10	104		
		17,32	166	16,68	135	14,28	123	17,64	118	21,87	110				
		17,82	167	17,42	136	14,81	123	18,16	118						
		18,35	167	17,96	136	15,35	124	18,70	118						
		18,82	167	18,16	135	15,81	125	19,17	118						
		19,32	168	18,50	135	16,32	125	19,72	119						
		19,82	168	19,03	135	16,65	125	20,32	121						
		20,34	168	19,57	135	17,32	126	20,83	121						
		20,86	169	20,12	135	17,82	127	21,40	122						
		21,37	170	20,62	135	18,35	127	21,92	122						
		21,85	170	21,18	135	18,82	127	22,42	122						
				21,74	135	19,32	128	22,98	124						
				22,28	135	19,84	128	23,54	124						
				22,83	135	20,34	128								
				23,93	133	20,86	129								
						21,37	130								
						21,64	130								

TABLEAU X

Essai 2 C

S 1		S 2		S 3		S 4		S 5		S 6		S 7		S 8		S 9		S 10	
t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h
10,35	229	6,90	230	4,29	229	1,03	229	0,10	10	1,93	10	4,22	10	6,83	10	12,34	10	19,19	5
10,62	228	7,16	229	4,56	228	1,32	228	0,23	75	2,01	41	4,56	11	7,13	10	12,56	10	19,16	5
10,94	225	7,42	228	4,92	224	1,63	226	0,53	80	2,20	44	4,90	30	7,39	10	12,84	15	19,56	15
11,25	223	7,68	226	5,27	220	1,80	223	0,85	95	2,48	47	5,26	46	7,71	26	13,08	20	19,77	17
11,60	222	7,92	225	5,58	215	2,16	214	1,18	98	2,98	58	5,59	51	8,04	35	13,34	24	20,44	22
11,90	219	8,15	222	5,88	209	2,27	203	1,46	100	3,08	62	5,88	55	8,37	43	13,58	33	20,32	30
12,22	216	8,38	221	6,22	202	2,77	193	1,80	103	3,37	67	6,22	61	8,69	50	13,84	35	20,55	35
12,56	211	8,62	218	6,58	199	3,07	184	2,10	104	3,63	70	6,56	62	9,00	52	14,06	42	20,86	38
22,90	208	8,88	213	6,88	198	3,35	176	2,42	105	3,91	74	6,88	67	9,35	59	14,30	45	21,12	41
13,20	206	9,12	210	7,18	191	3,66	171	2,74	107	4,18	76	7,18	70	9,67	61	14,55	46	21,42	45
13,50	204	9,16	208	7,54	186	4,15	162	3,04	108	4,46	78	7,55	71	10,00	62	14,81	50	21,67	49
13,80	201	9,60	204	7,88	184	4,45	159	3,36	108	4,95	81	8,11	75	10,30	64	15,04	54	21,94	51
14,15	199	9,84	201	8,20	181	4,74	156	3,68	109	5,03	83	8,21	76	10,64	67	15,30	56	22,24	55
14,48	198	10,12	200	8,48	176	5,24	153	4,02	110	5,28	83	8,51	77	10,96	70	15,54	59	22,54	58
14,76	196	10,38	196	8,78	175	5,59	149	4,30	110	5,56	85	8,79	81	11,28	72	15,77	60		
15,05	193	10,62	195	9,14	173	5,86	146	4,59	110	5,84	87	9,15	83	11,42	73	16,03	61		
15,34	191	10,86	193	9,48	172	6,20	145	4,90	110	6,40	90	9,49	84	11,92	74	16,27	63		
15,60	190	11,10	190	9,78	169	6,50	144	5,24	112	6,90	94	9,86	85	12,24	77	16,77	67		
15,90	188	11,33	189	10,08	166	6,80	142	5,59	112	7,43	96	10,64	84	12,56	79	17,24	68		
16,14	185	11,57	188	10,36	165	7,10	142	5,88	114	7,91	97	11,21	85	12,90	82	17,74	70		
16,40	183	11,83	188	10,63	166	7,42	141	6,22	114	8,38	100	11,71	87	13,20	83	18,25	71		
16,70	180	12,09	185	10,92	163	8,02	139	6,52	115	8,88	102	12,27	90	13,50	82	18,72	74		
16,98	178	12,34	182	11,23	161	8,64	139	7,13	115	9,36	104	12,85	91	13,82	83	19,21	74		

[illegible]

TABLEAU XI

Essai 3 C

S 1		S 2		S 3		S 4		S 5		S 6		S 7		S 8		S 9		S 10	
t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h
10,48	228	6,81	228	4,26	228	0,94	228	0,20	42	1,10	40	3,93	40	6,26	38	9,92	37	14,23	37
10,76	228	6,99	228	4,58	228	1,20	228	0,40	115	1,44	40	4,25	40	6,60	38	10,18	37	14,47	37
11,10	226	7,22	227	4,90	225	1,40	228	0,70	100	1,71	40	4,58	76	6,90	38	10,43	37	14,75	37
11,42	223	7,46	226	5,10	221	1,72	226	1,10	105	1,97	40	4,90	90	7,25	80	10,66	36	15,03	70
11,74	220	7,72	226	5,52	216	2,04	217	1,39	105	2,21	43	5,20	95	7,56	85	10,92	74	15,30	74
12,02	218	7,96	224	5,84	208	2,40	203	1,72	107	2,42	90	5,54	95	7,91	88	11,18	79	15,59	77
12,37	213	8,20	222	6,16	206	2,72	194	2,07	107	2,66	104	5,84	95	8,20	90	11,41	80	15,85	76
12,67	211	8,44	218	6,48	200	3,06	185	2,40	112	2,94	105	6,17	96	8,46	90	11,60	80	16,10	76
12,98	208	8,86	215	6,80	195	3,50	173	2,74	116	3,25	105	6,46	96	8,70	91	11,85	82	16,38	77
13,29	207	8,93	212	7,10	190	3,80	167	3,06	118	3,50	110	6,81	98	8,98	92	12,12	82	16,65	79
13,57	204	9,18	209	7,40	186	4,26	162	3,40	118	3,80	106	7,09	99	9,24	91	12,35	84	16,97	80
13,85	201	9,42	206	7,74	183	4,60	157	3,72	120	4,07	108	7,41	99	9,50	94	12,61	85	17,23	80
14,14	198	9,66	204	8,06	180	4,98	153	4,07	119	4,34	108	7,76	102	9,74	95	12,85	84		
14,45	196	9,90	201	8,35	177	5,54	150	4,57	121	4,61	109	8,05	105	9,98	96	13,10	86		
14,74	195	10,15	199	8,64	175	5,84	148	4,67	121	4,91	109	8,35	105	10,24	96	13,33	86		
15,02	193	10,41	196	8,95	173	6,24	145	4,99	122	5,18	110	8,65	105	10,48	98	13,58	87		
15,30	191	10,65	194	9,26	171	6,59	142	5,32	121	5,42	110	8,95	106	10,74	99	13,83	89		
15,60	188	10,90	192	9,52	168	6,99	139	5,66	122	5,70	110	9,28	106	10,97	99	14,10	89		
15,70	184	11,16	191	9,83	167	7,41	139	5,99	123	5,96	111	9,55	107	11,25	101	14,30	90		

[illegible]

TABLEAU XII

Essai 4 C

S 1		S 2		S 3		S 4		S 5		S 6		S 7		S 8		S 9		S 10	
t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h
11,02	227	7,01	230	4,40	230	1,07	229	0,17	159	1,61	159	3,58	159	6,02	159	9,04	156	12,60	156
11,30	225	7,24	230	4,70	227	1,28	228	0,43	204	1,89	159	3,88	159	6,26	158	9,31	155	12,90	159
11,43	223	7,50	229	5,00	226	1,57	228	0,51	184	2,21	188	4,15	159	6,51	160	9,56	156	13,14	185
11,81	221	7,76	228	5,30	221	1,87	224	0,98	186	2,49	195	4,44	169	6,76	181	9,82	180	13,39	204
12,06	220	8,00	226	5,60	216	2,25	214	1,14	198	2,77	182	4,72	204	7,03	204	10,05	201	13,64	180
12,30	217	8,28	224	5,88	211	2,51	207	1,54	189	3,05	189	5,02	180	7,29	175	10,28	173	13,92	178
12,52	214	8,58	222	6,16	208	2,85	195	1,80	196	3,45	184	5,31	183	7,55	175	10,54	173	14,20	200
12,79	211	8,80	220	6,56	201	3,15	190	2,06	198	3,65	191	5,62	186	7,81	200	10,81	201	14,45	173
13,00	208	9,00	217	6,80	195	3,40	188	2,30	193	3,95	187	5,88	189	8,04	182	11,06	182	14,72	175
		9,26	213			3,63	192	2,58	190	4,20	184	6,16	200	8,29	179	11,34	181	14,95	199
		9,53	210			3,96	195	2,63	192	4,50	190	6,49	182	8,56	199	11,60	194	15,22	179
		9,81	207			4,22	196	3,14	190	4,76	190	6,81	198	8,81	182	11,85	183	15,55	179
		11,01	204			4,48	191	3,40	190	5,05	190	7,10	182	9,04	184	12,08	175	15,79	195
						4,76	190	3,64	191	5,36	192	7,35	196	9,25	195	12,34	193	16,04	178
						5,01	192	3,92	190	5,65	190	7,65	186	9,50	180	12,59	194	16,28	180
						5,30	196	4,16	191	5,92	192	7,96	189	9,76	182	12,85	181	16,56	193
						5,60	191	4,44	191	6,20	190	8,26	197	10,04	184	13,07	192		
						5,85	190	4,72	191	6,49	192	8,53	196	10,30	186	13,32	180		
						6,16	194	4,94	191	7,00	194	8,80	190	10,54	191	13,58	186		

6,50	193	5,20	192	7,50	192	9,08	196	10,90	183	13,81	187
6,81	193	5,94	190	8,00	192	9,41	192	11,05	193	14,10	182
7,10	193	6,00	191	8,54	191	9,98	193	11,28	182	14,62	180
7,35	189	6,26	190	9,02	193	10,48	190	11,54	191	15,10	180
7,79	191	6,49	190	9,54	192	11,01	190	11,80	184		
8,00	190	6,75	190	10,04	190	11,55	190	12,29	185		
8,26	193	7,03	190	10,52	191	12,05	190	12,78	196		
8,78	192	7,28	190	11,05	192	12,61	190	13,30	186		
9,25	190	7,78	190	11,68	190	13,15	190	13,80	186		
9,76	193	8,26	190	12,05	191	13,66	190	14,28	185		
10,28	189	8,79	190	12,59	192	14,21	190	14,80	186		
10,78	192	9,26	190	13,07	190	14,70	190	15,30	186		
11,15	190	9,76	190	13,56	191	15,14	190				
12,06	190	10,29	190	14,11	190	15,79	190				
12,58	191	10,80	190	14,64	191						
13,09	191	11,27	190	15,11	190						
13,55	190	11,78	190								
14,08	192	12,30	190								
14,71	192	12,76	190								
15,24	191	13,28	190								
		13,80	190								
		14,25	190								
		14,79	190								
		15,26	190								

ANNEXE II

PLANCHES I A 86

PLANCHE 1

Profondeur de l'onde aval
en fonction de la profondeur initiale aval

(Présentation adimensionnelle)

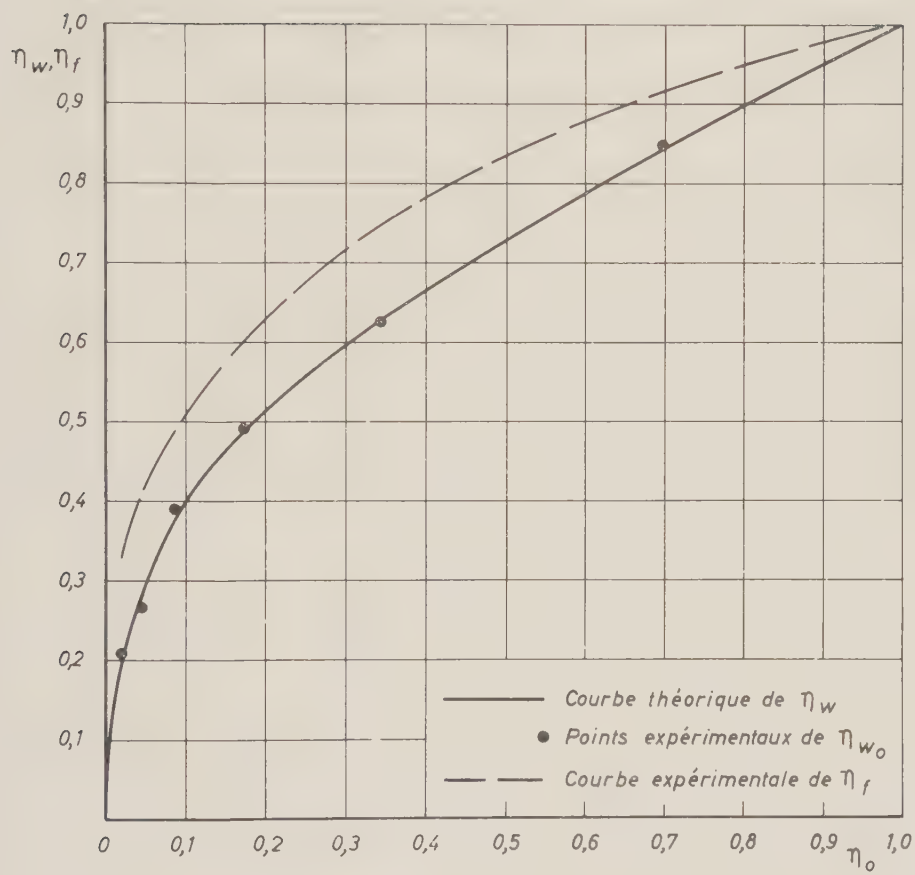


PLANCHE 2

Vitesse d'écoulement dans le corps de l'onde descendante en fonction de la profondeur initiale aval
(Présentation adimensionnelle)

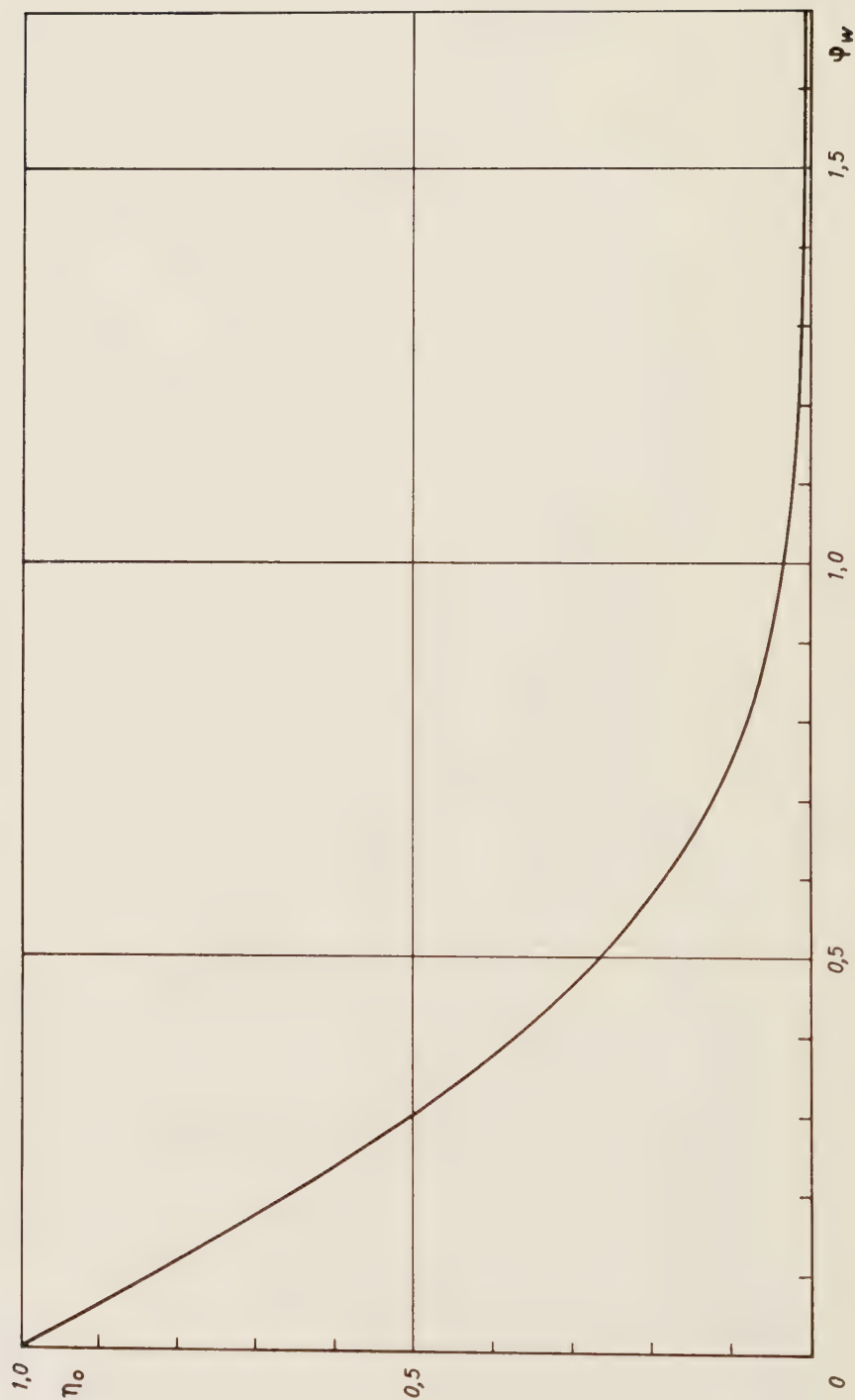


PLANCHE 3

Célérité du front de l'onde descendante en fonction de la profondeur initiale aval

(Présentation adimensionnelle)

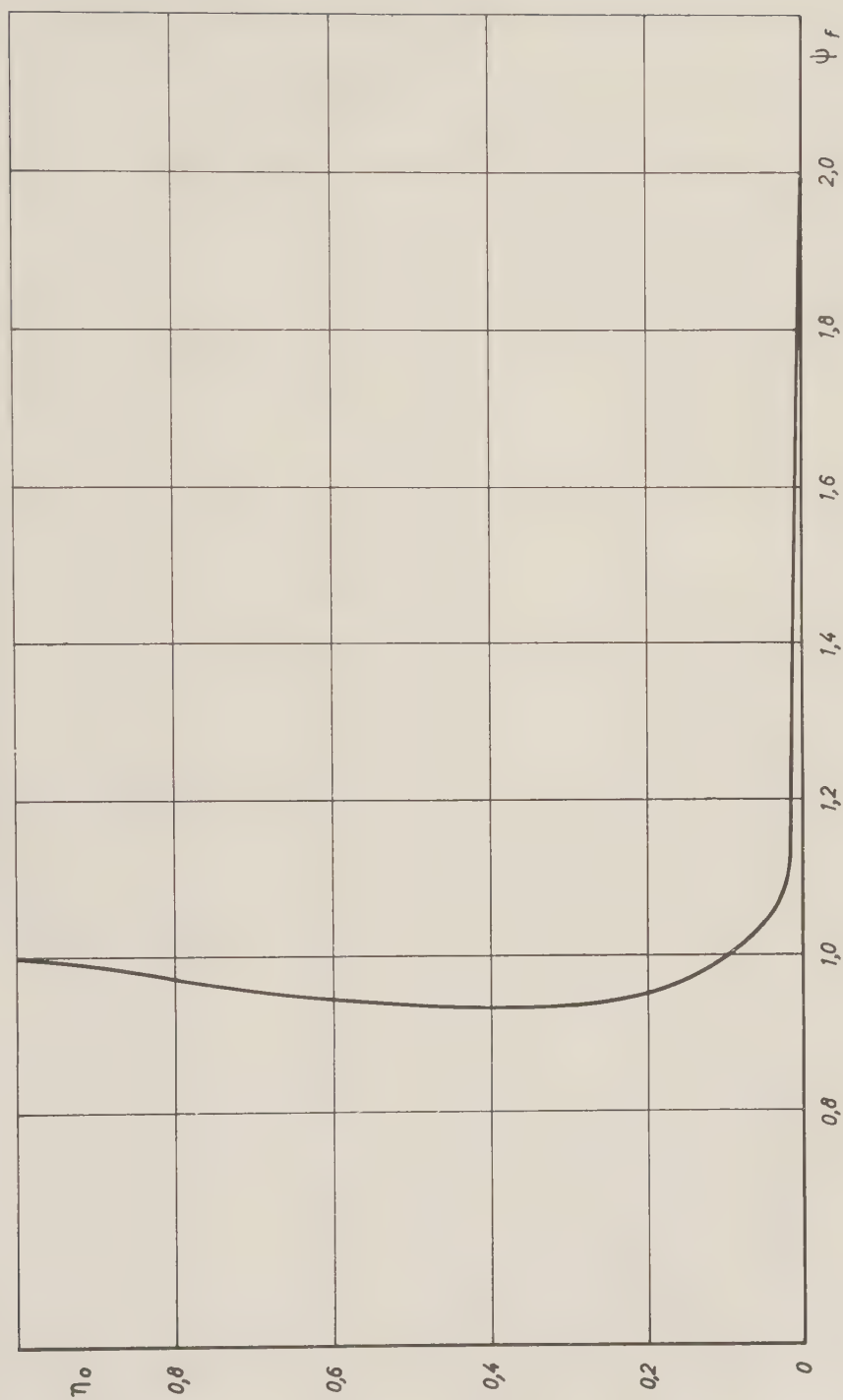


PLANCHE 4

Canal de mesure

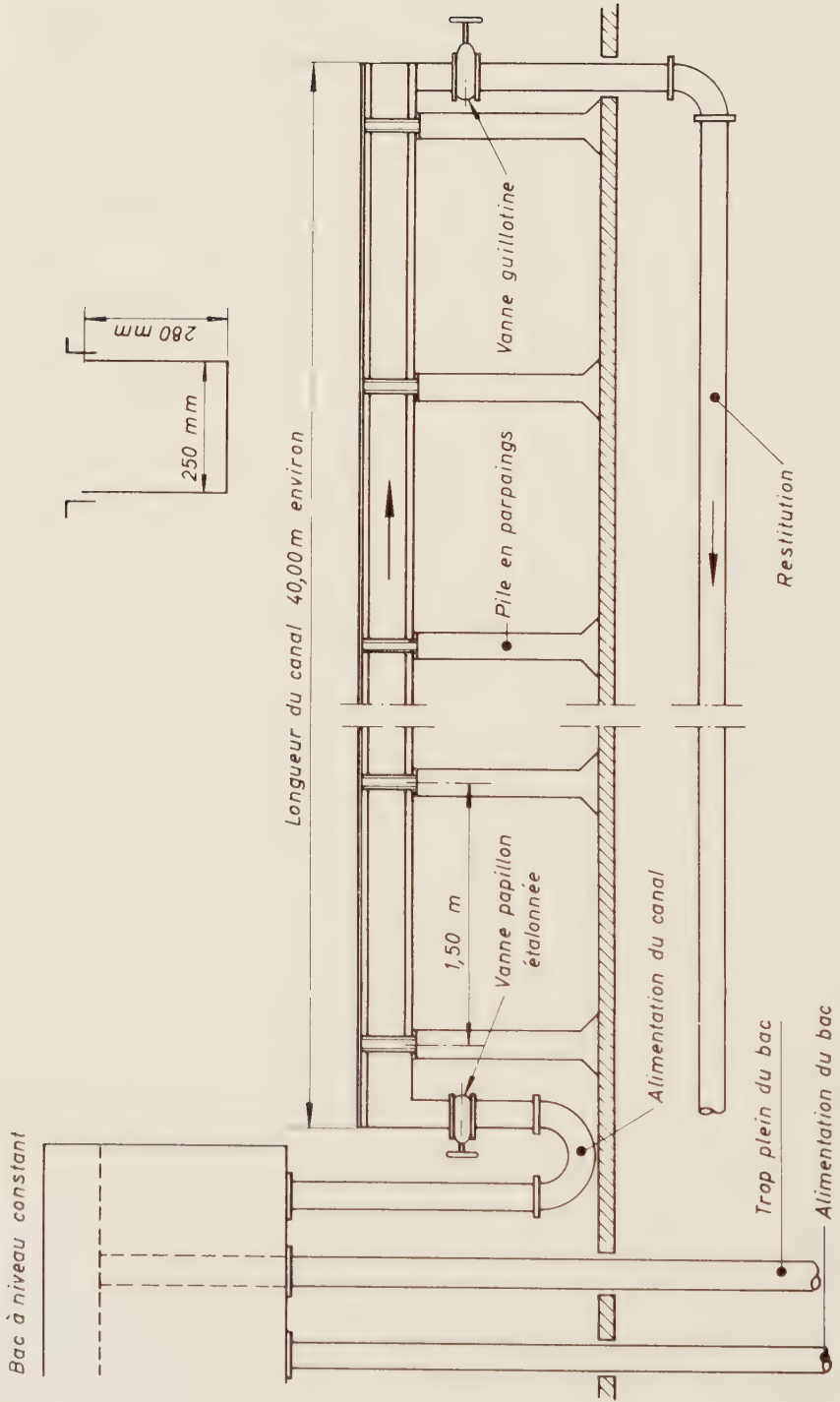
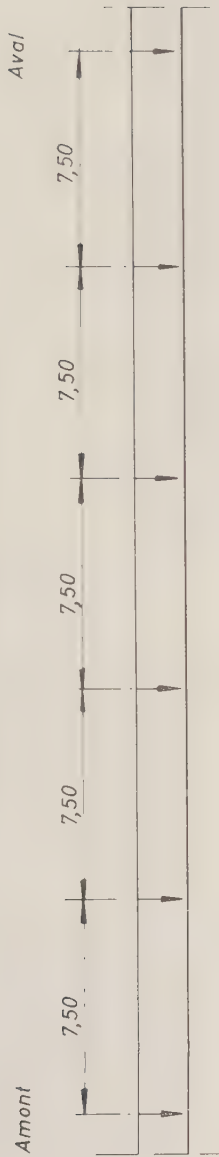


PLANCHE 5

Disposition des pointes limnimétriques



Disposition des sections photographiques

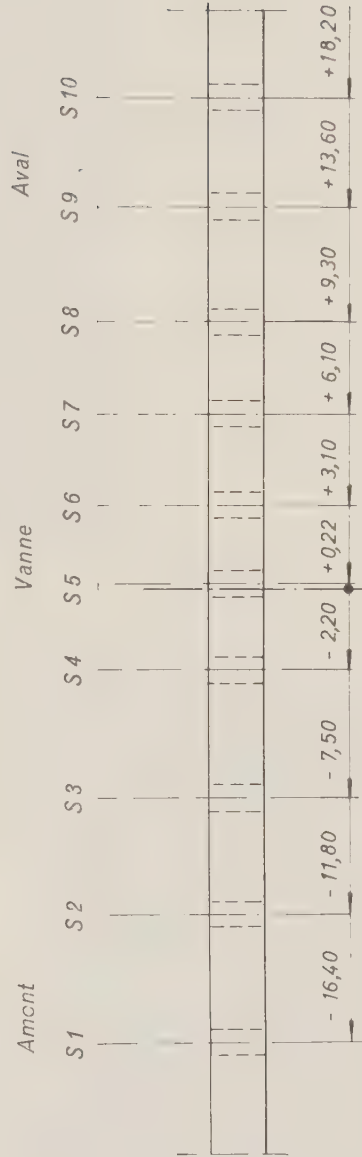


PLANCHE 6

Vanne étanche à ouverture rapide

(Dessin de principe)

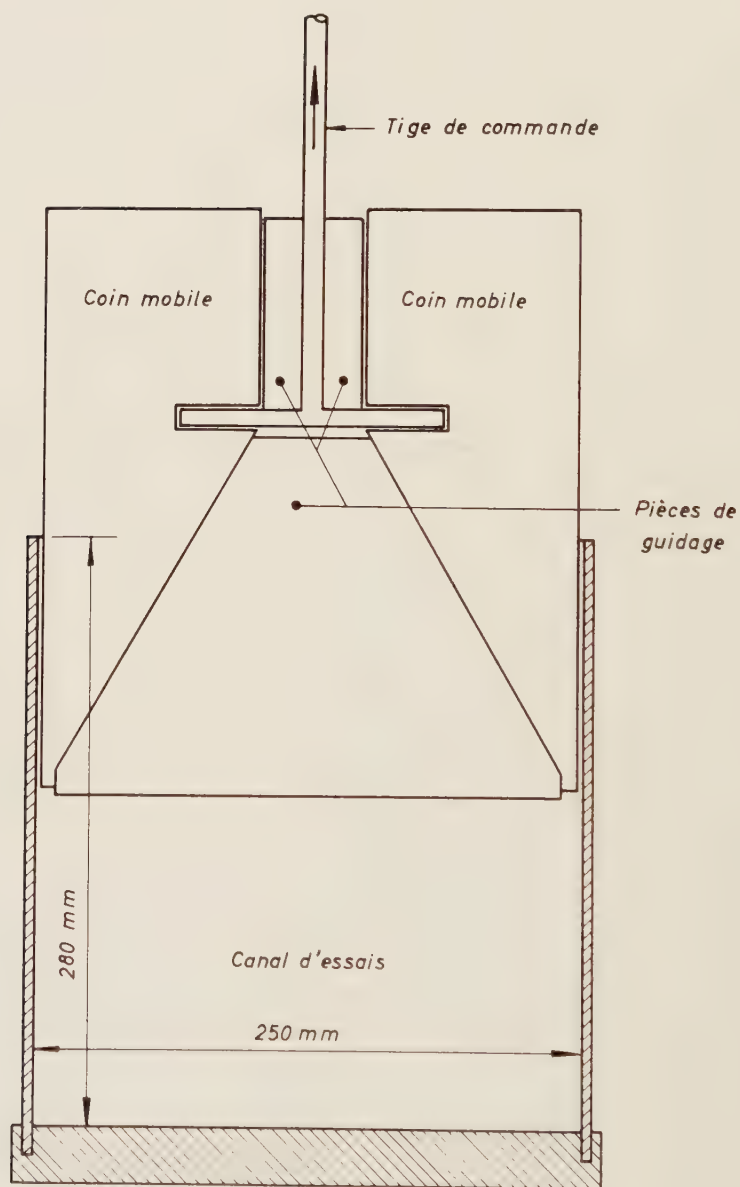


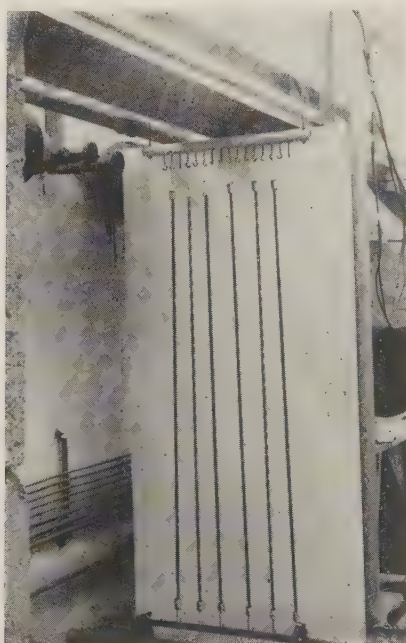
PLANCHE 7



Montage de la vanne



Vue de la vanne
et de son mécanisme de levée



Système de traction
par sandows

PLANCHE 8

Chariot de prise de vues photographiques

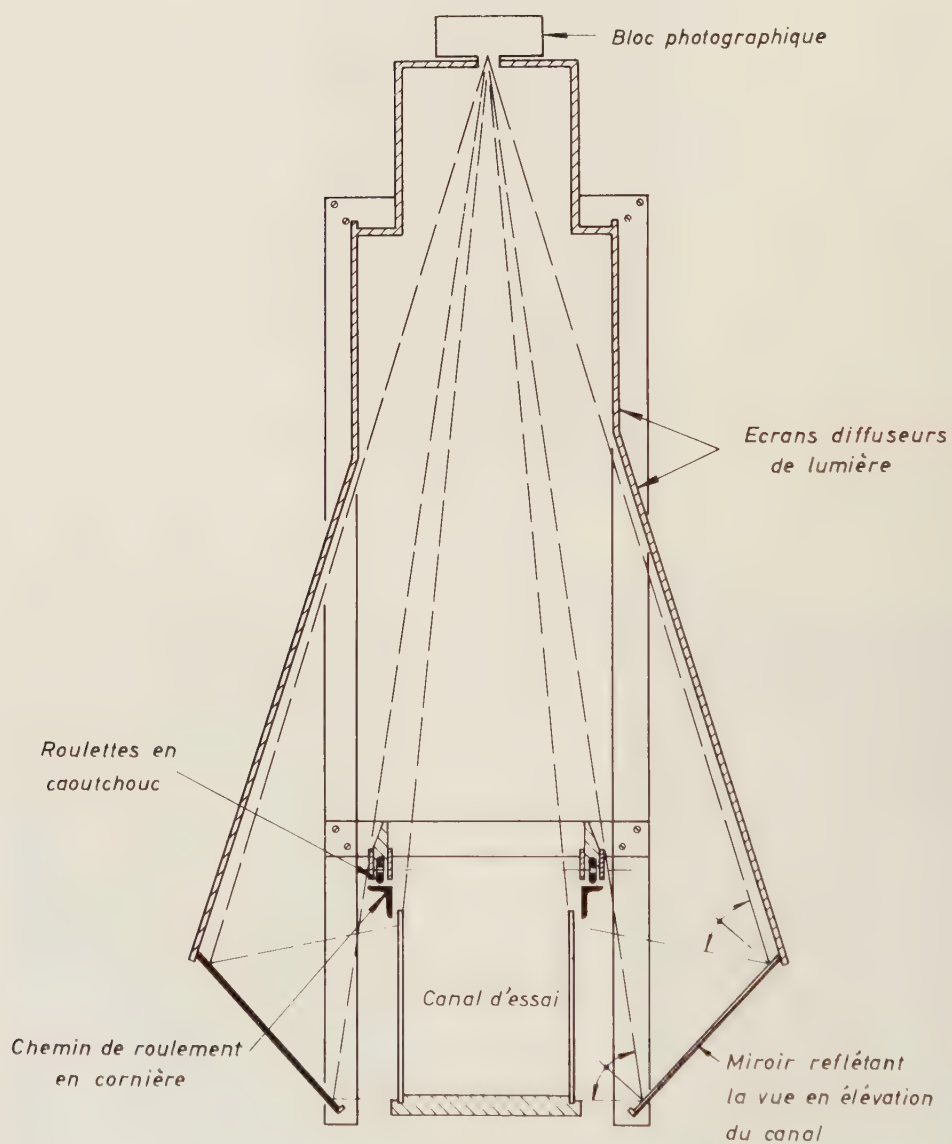
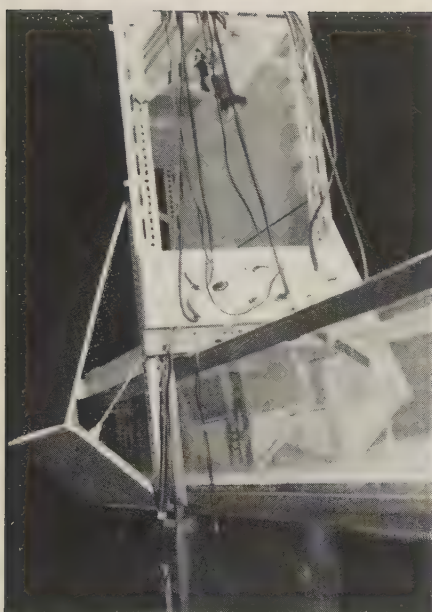
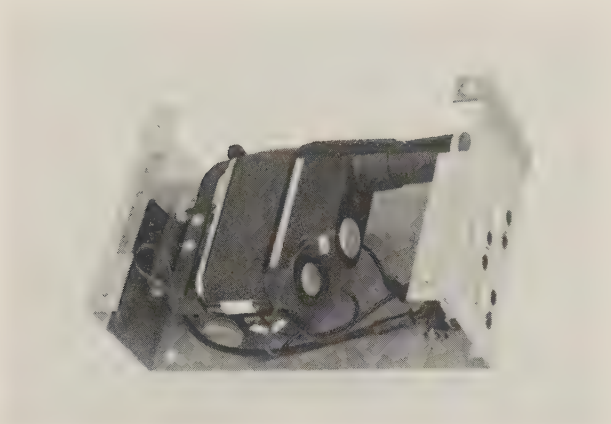


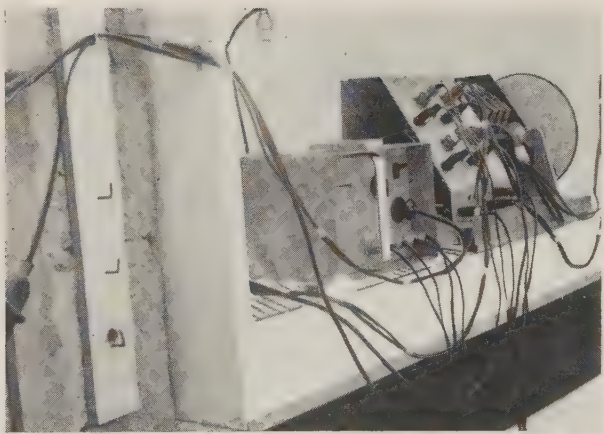
PLANCHE 9



Chariot de prise de vue

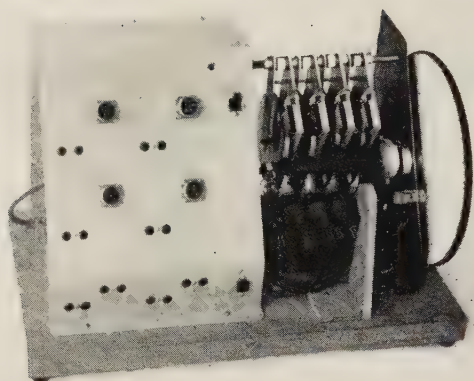


Bloc photographique

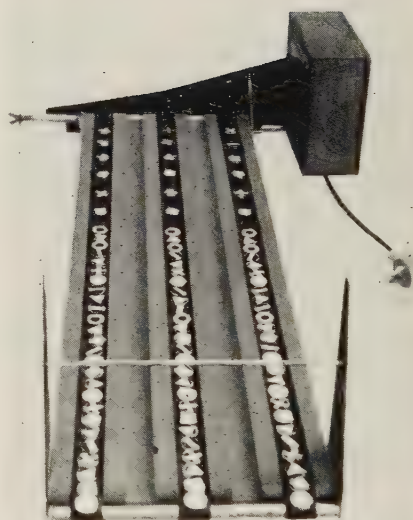


Appareil de télécommande et d'enregistrement

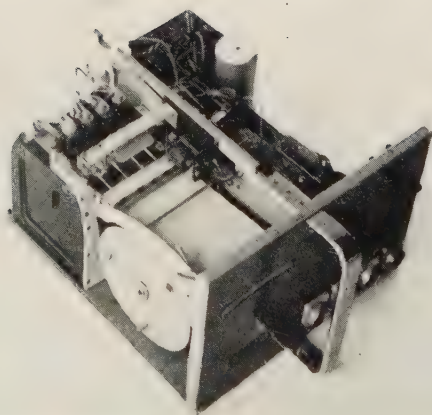
PLANCHE 10



Appareil de télécommande des blocs photographiques



Distributeur de flotteurs



Enregistreur a cinq voies

PLANCHE 11

Coefficient de perte de charge (fond lisse)

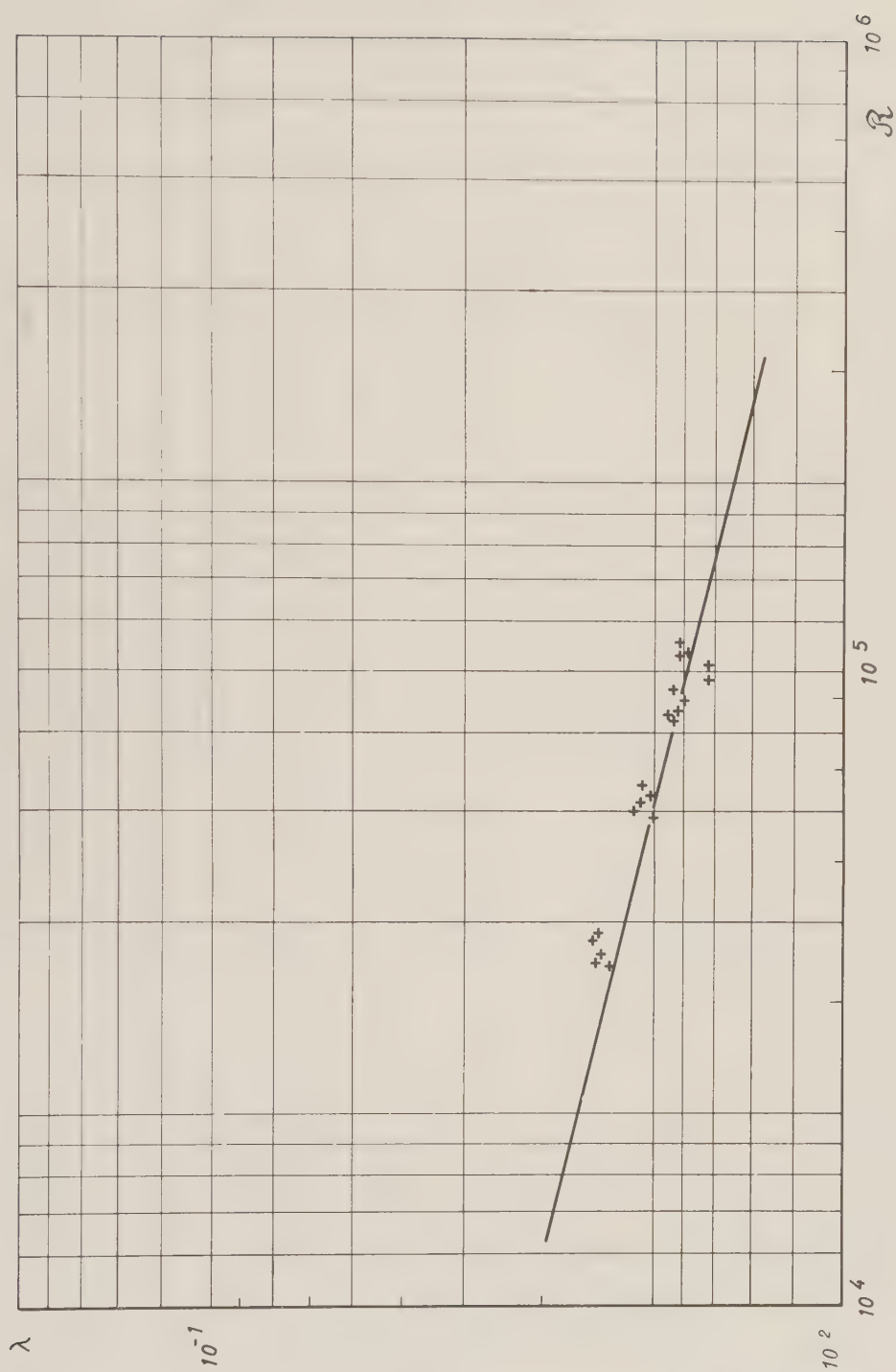


PLANCHE 12. — Répartition longitudinale du nombre de Reynolds (présentation adimensionnelle)

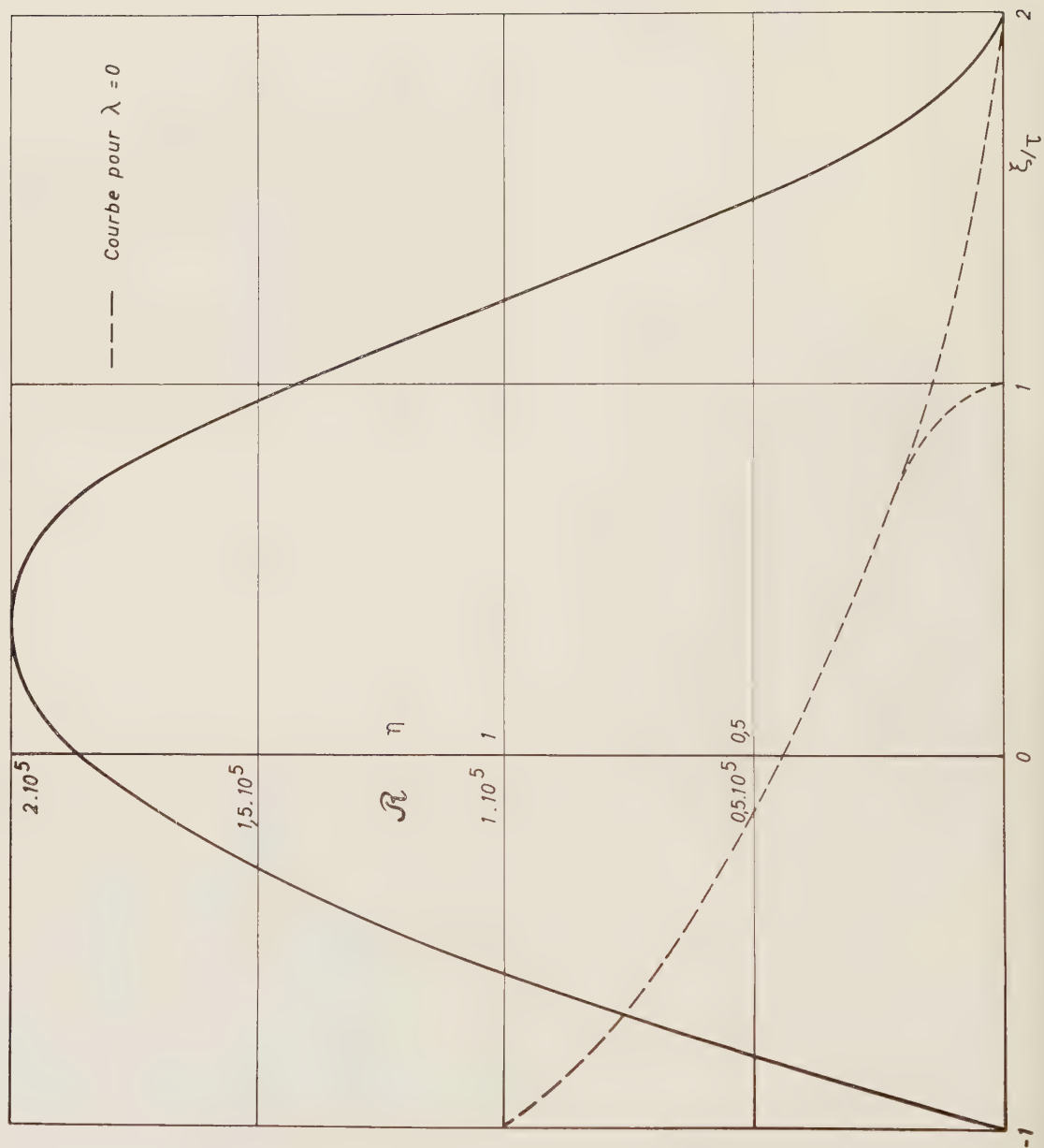
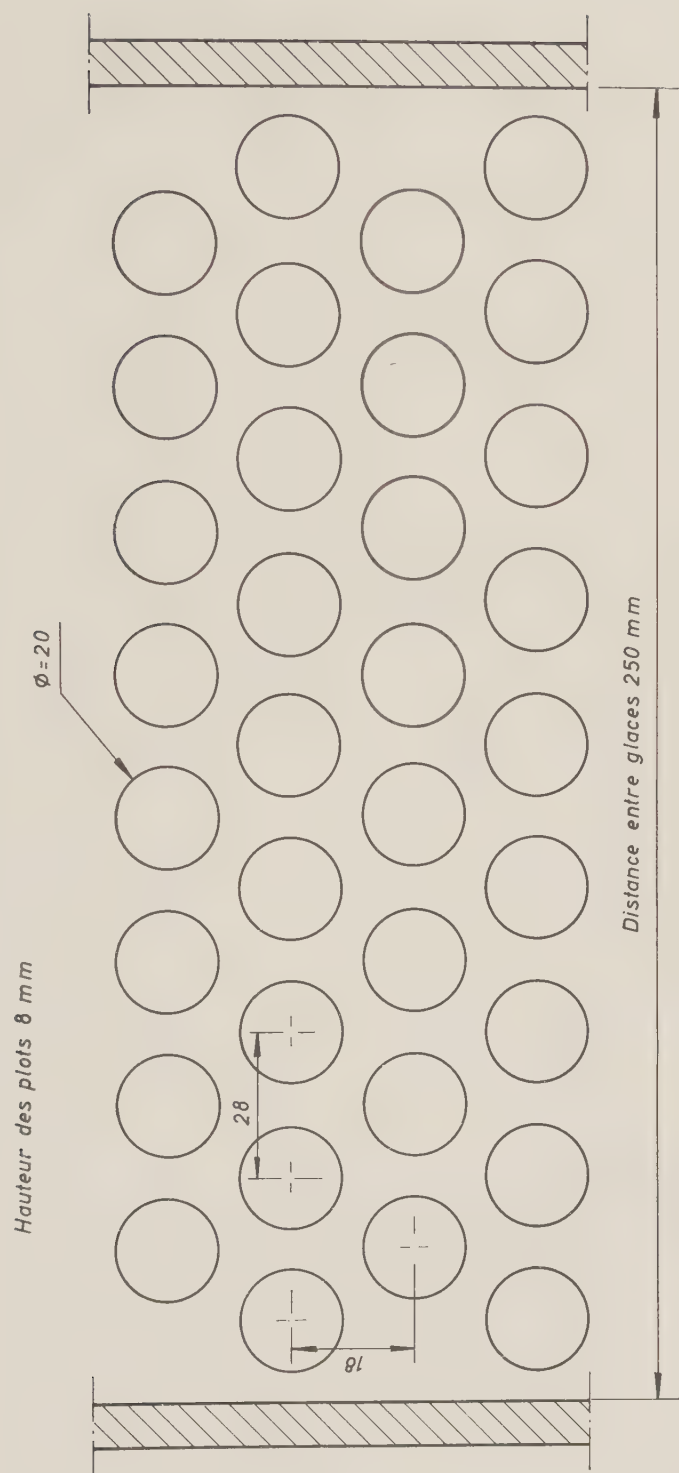


PLANCHE 13

Aménagement du fond rugueux



Coefficient de perte de charge (fond rugueux)

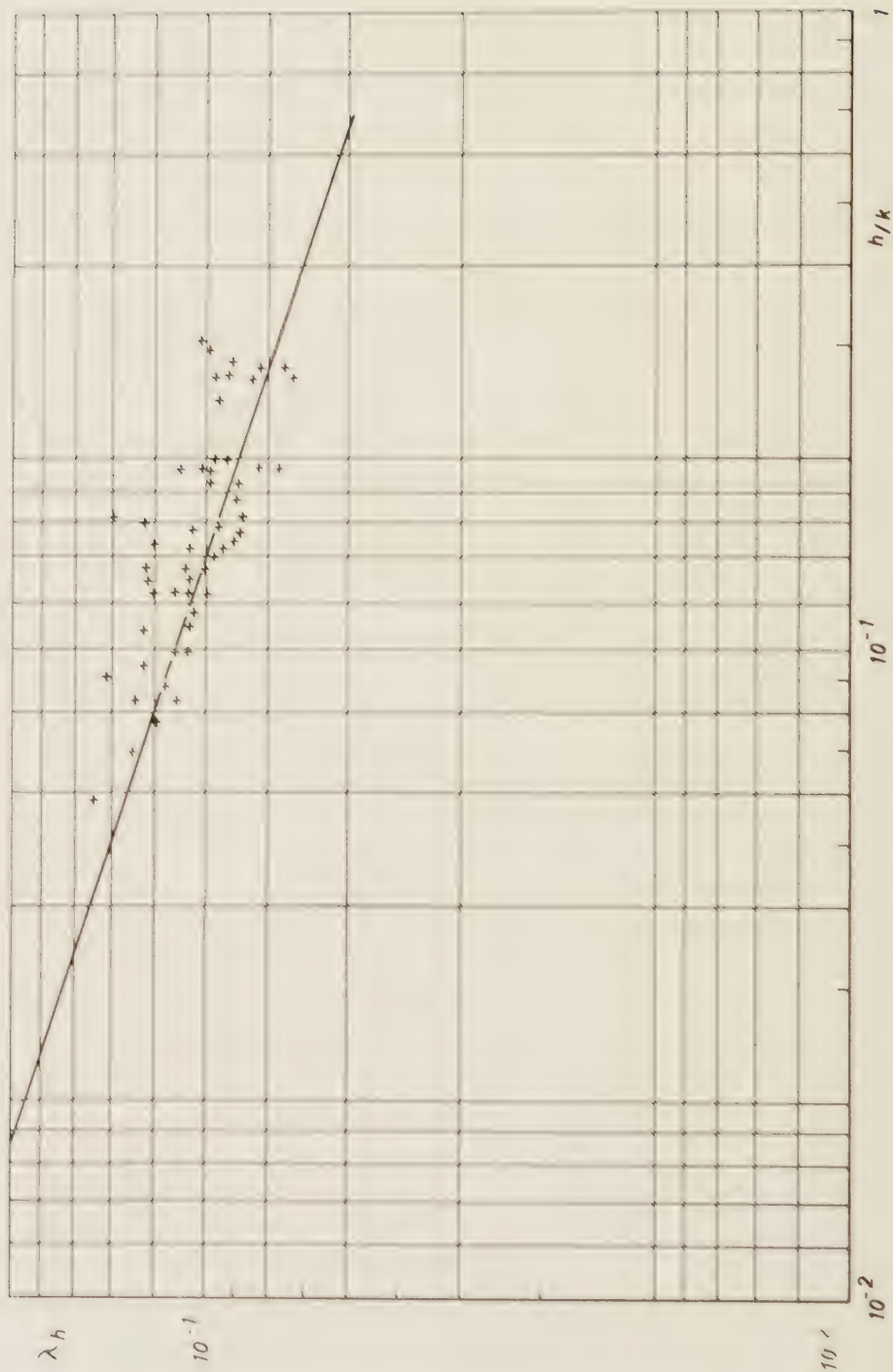
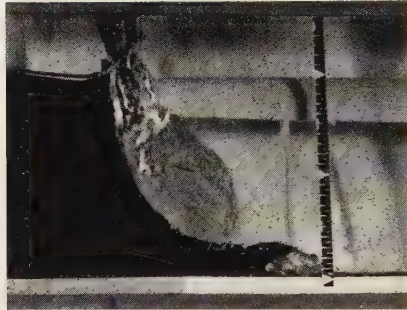
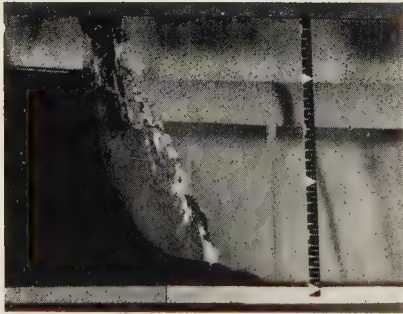


PLANCHE 16

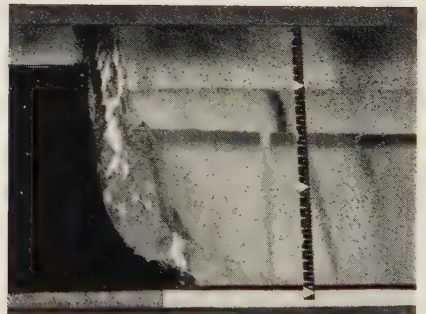
Levées de vanne



Temps de levée : 16/100 s



Temps de levée : 12/100 s



Temps de levée : 9/100 s

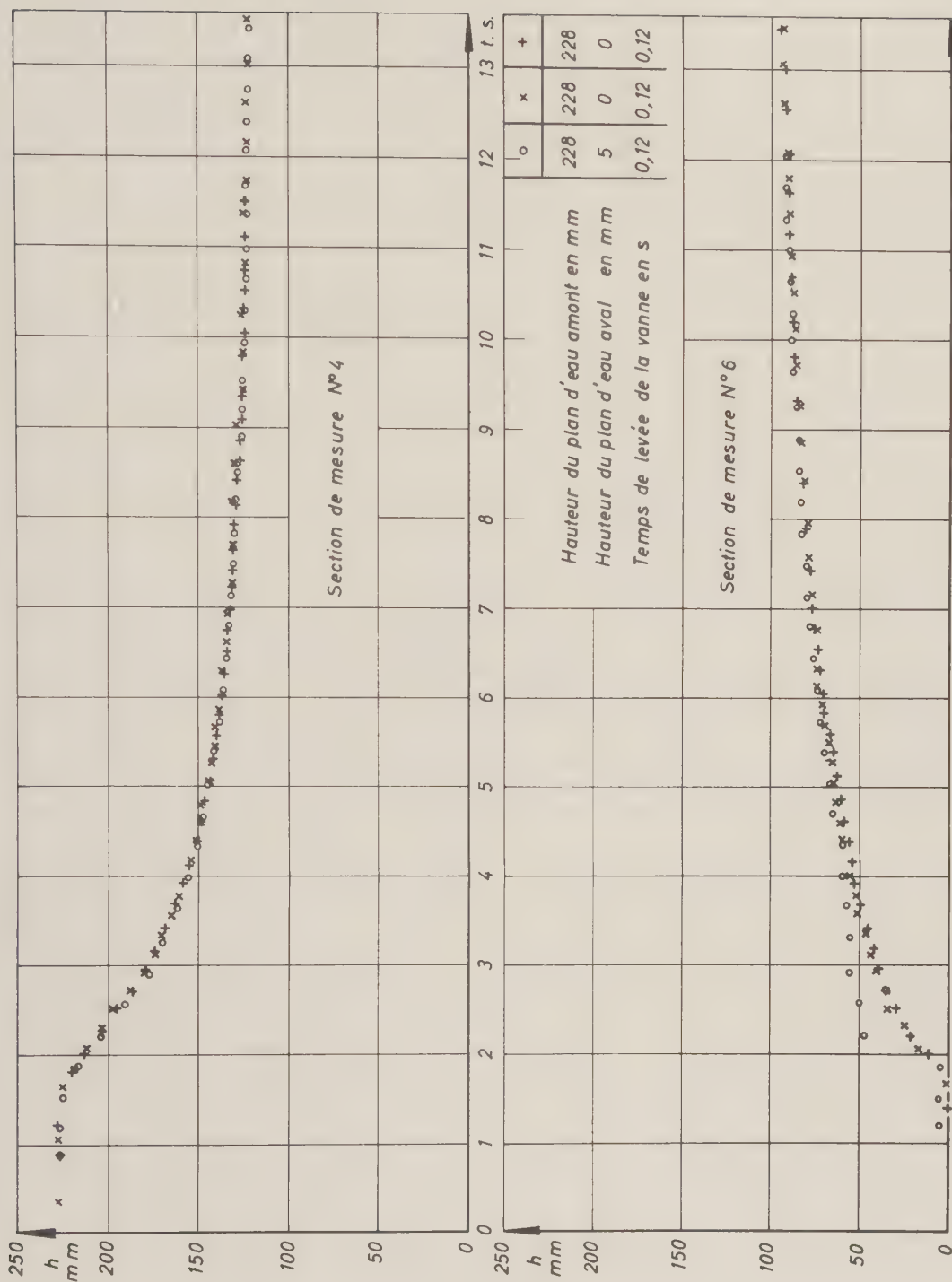


PLANCHE 18. — Essais d'influence du temps de levée de la vanne

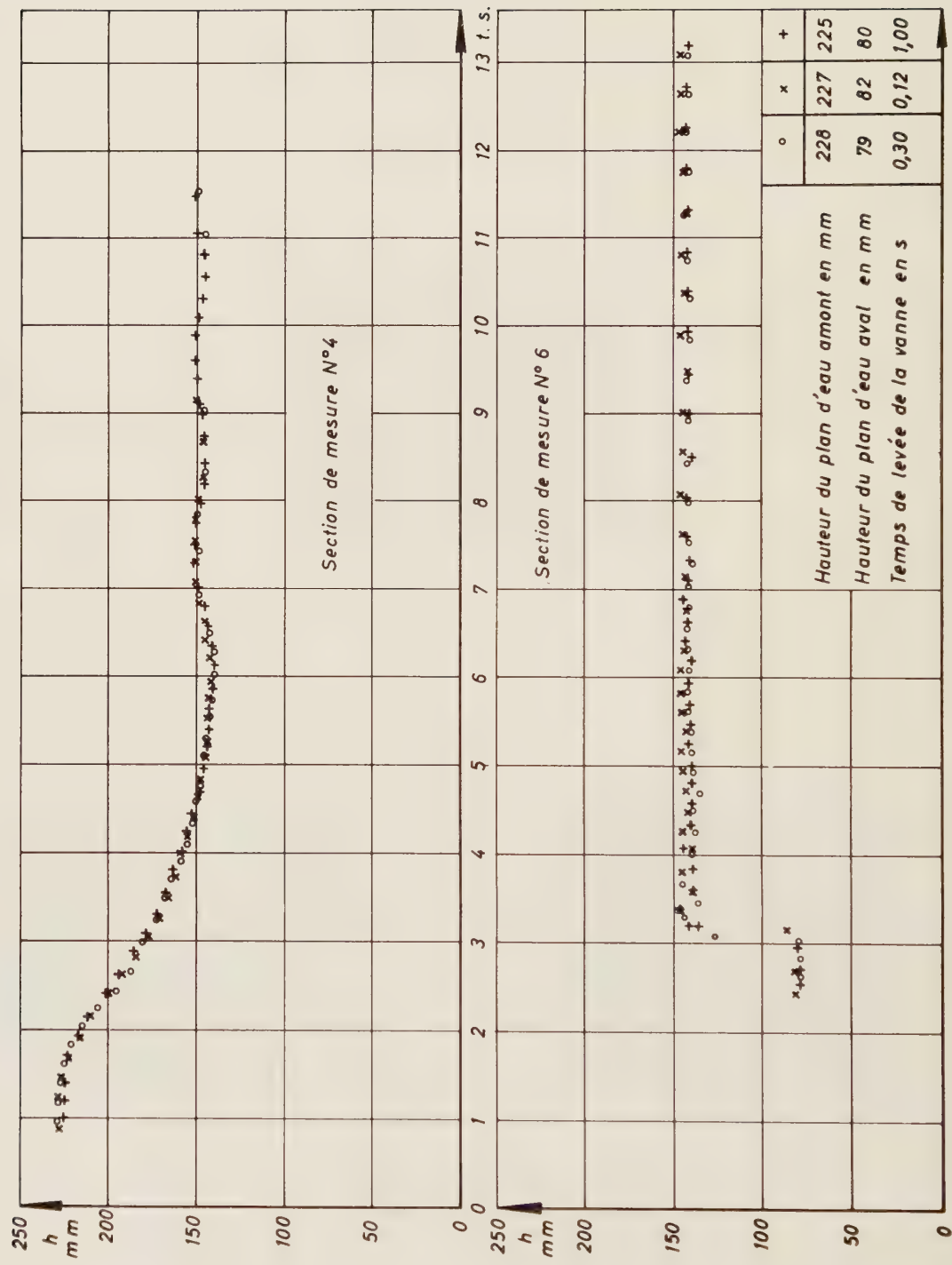


PLANCHE 19

Lignes d'eau instantanées (du temps $t = 3$ s au temps $t = 14$ s)

Essai 1 B

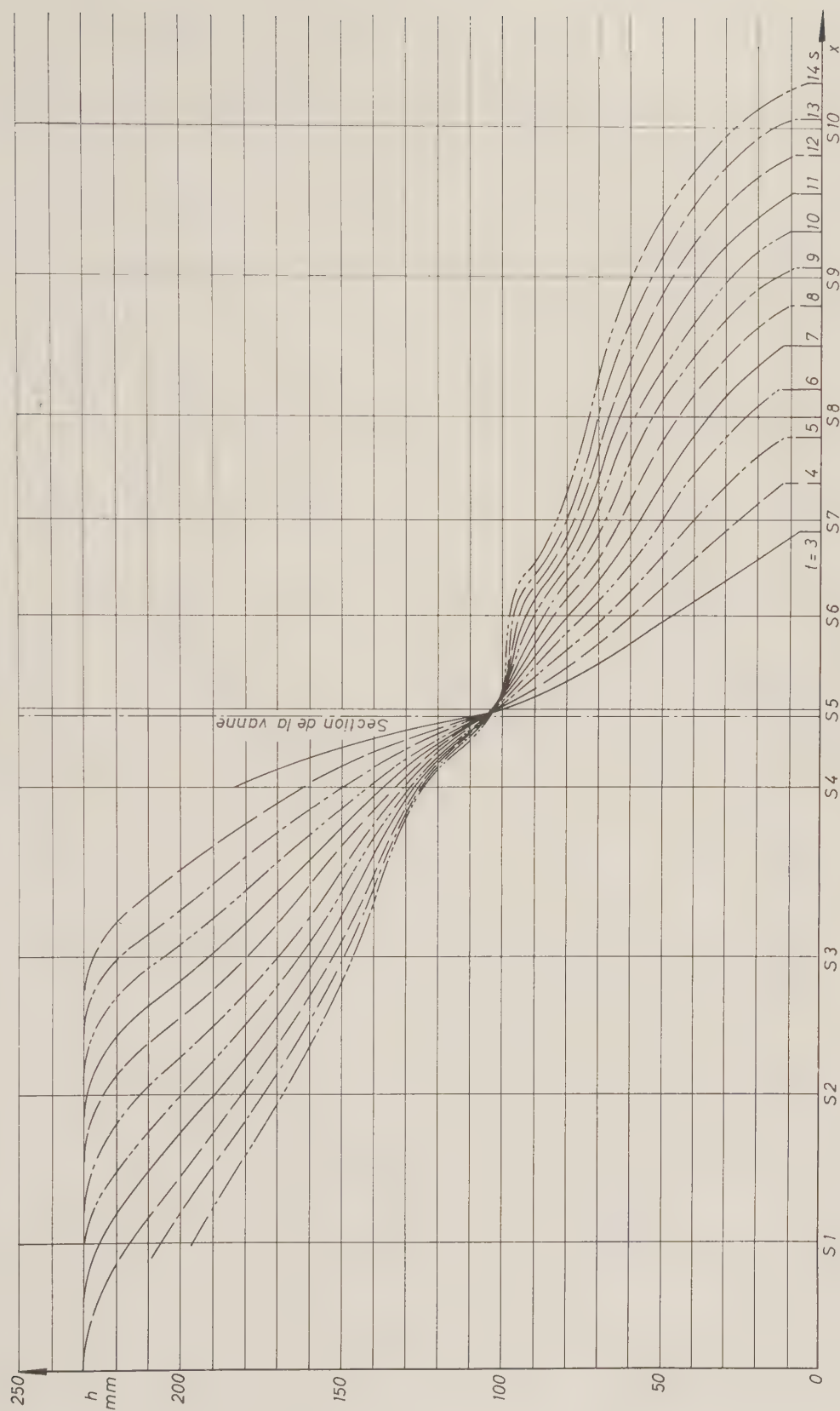


PLANCHE 20

Lignes d'eau instantanées (du temps $t = 3$ s au temps $t = 14$ s)

Essai 3 B



Lignes d'eau instantanées (du temps $t = 3$ s au temps $t = 14$ s)

ESSAI 5 B

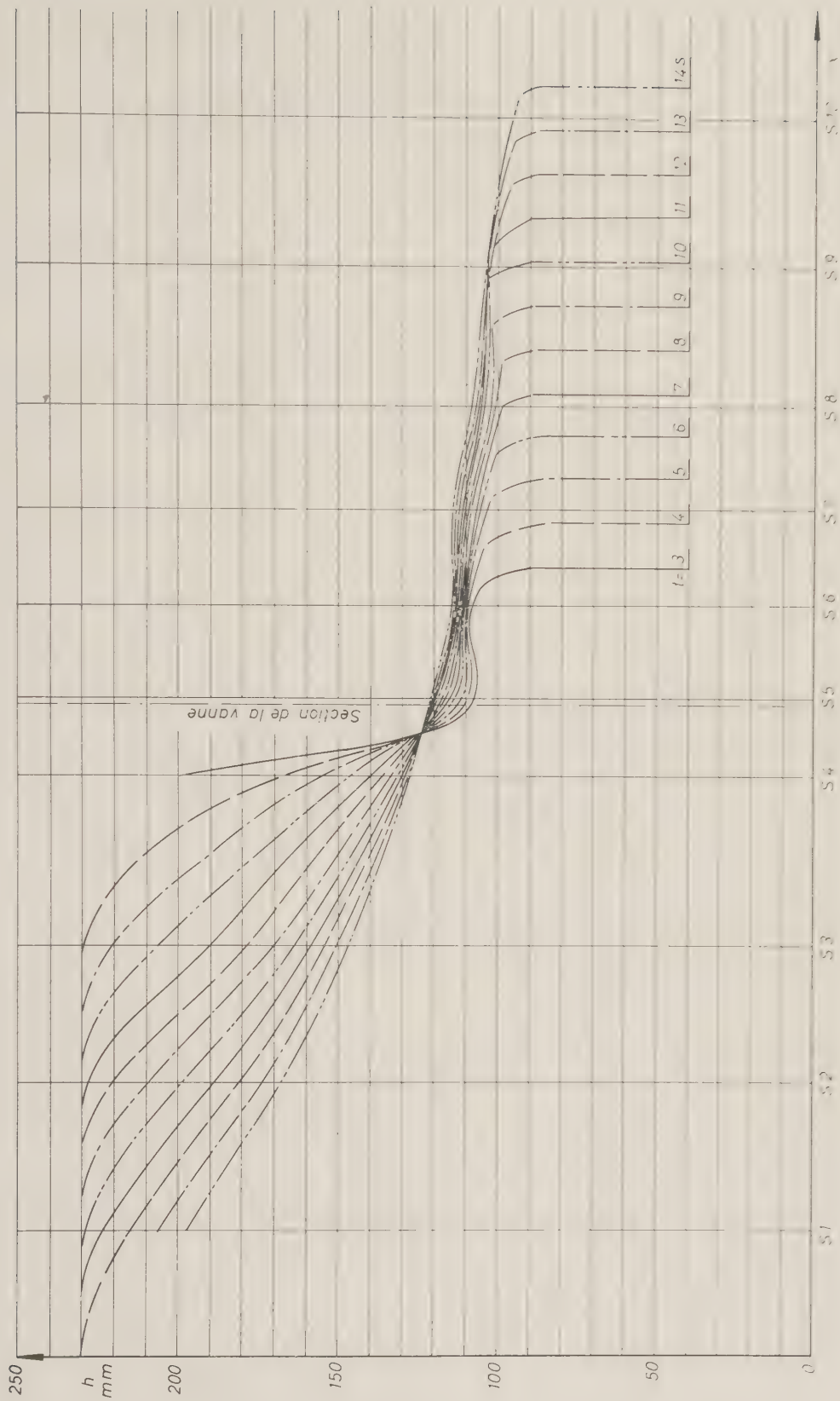


PLANCHE 22

Lignes d'eau instantanées (du temps $t = 3$ s au temps $t = 14$ s)

ESSAI 7 B

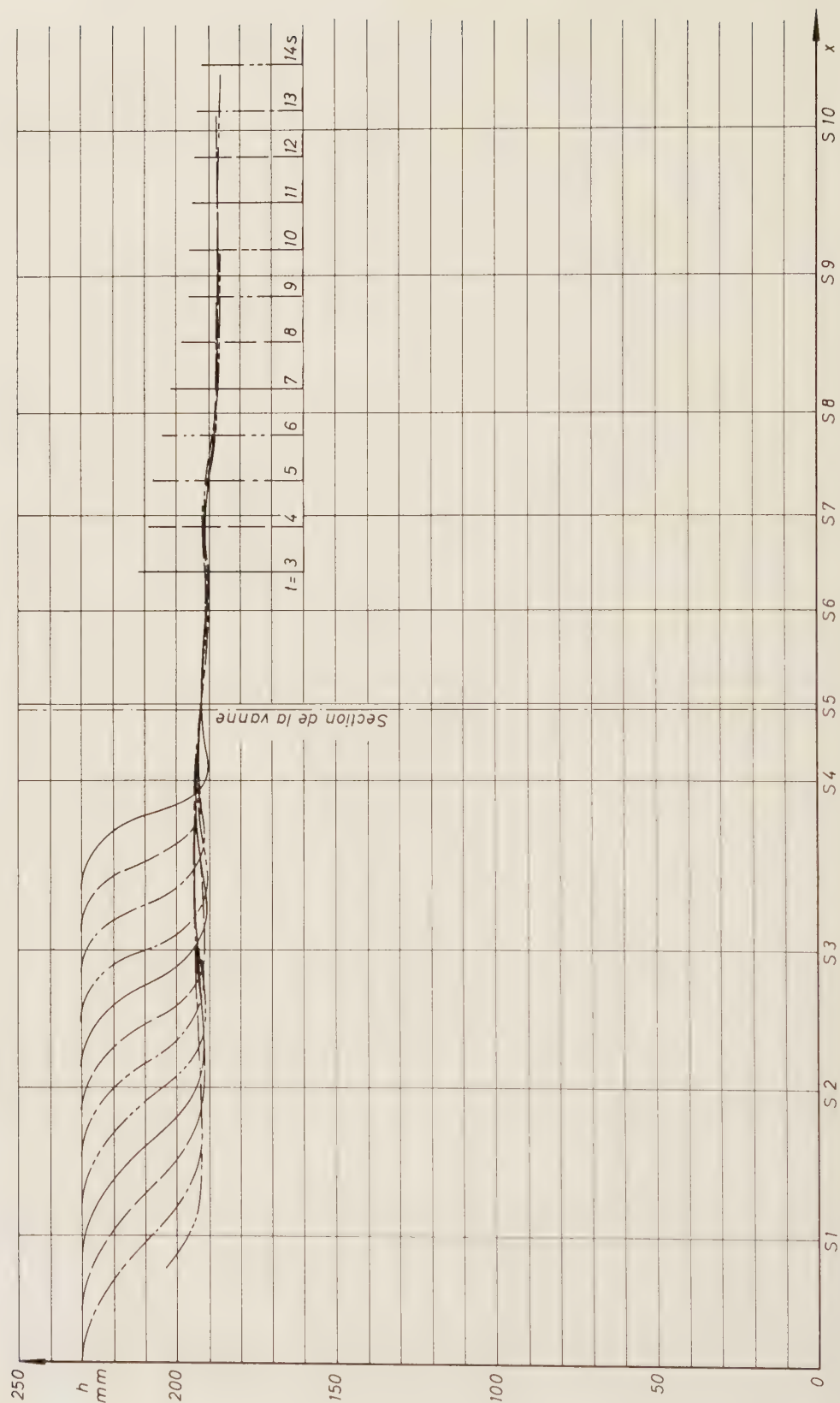


PLANCHE 23

Vitesse moyennes en fonction du temps

ESSAI 1 B

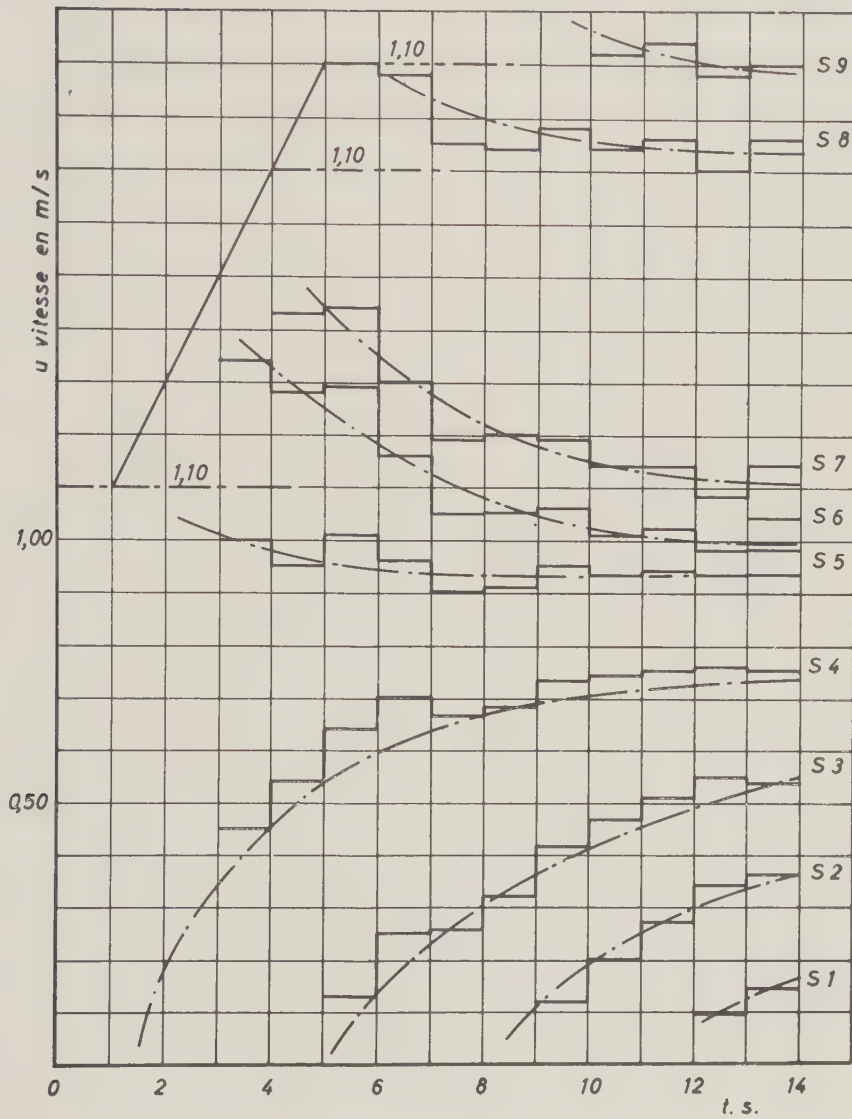


PLANCHE 24

Vitesse moyennes en fonction du temps

ESSAI 5 B

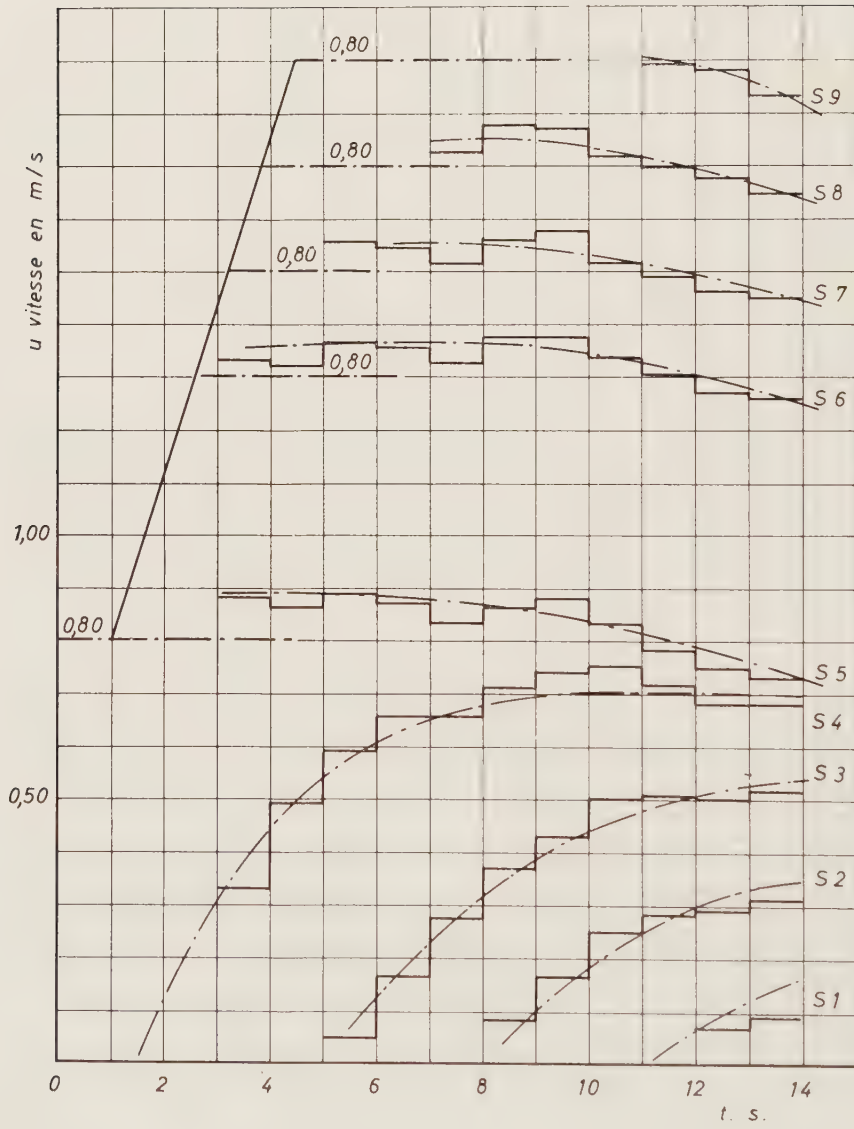


PLANCHE 25

Vitesses moyennes en fonction du temps

ESSAI 7 B

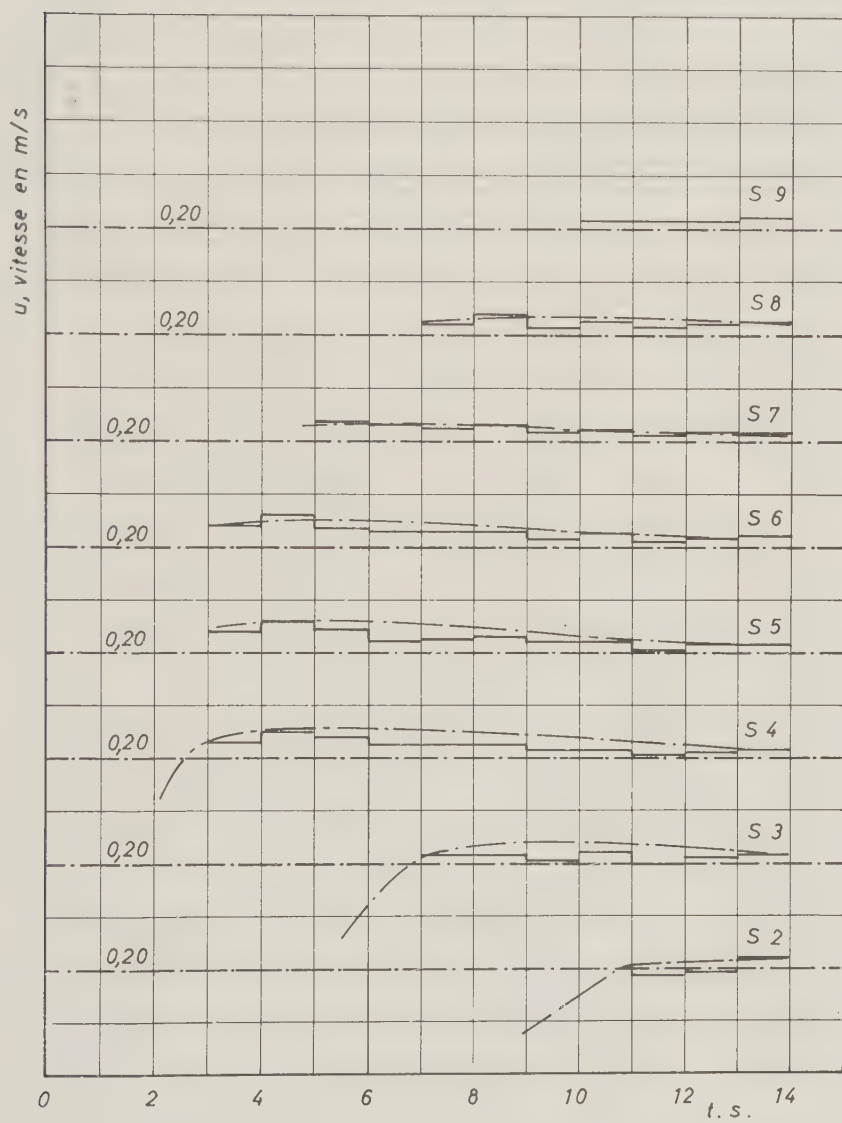


PLANCHE 26

Vitesses de surface en fonction du temps
(Comparaison avec les vitesses moyennes correspondantes)

ESSAI 1 B

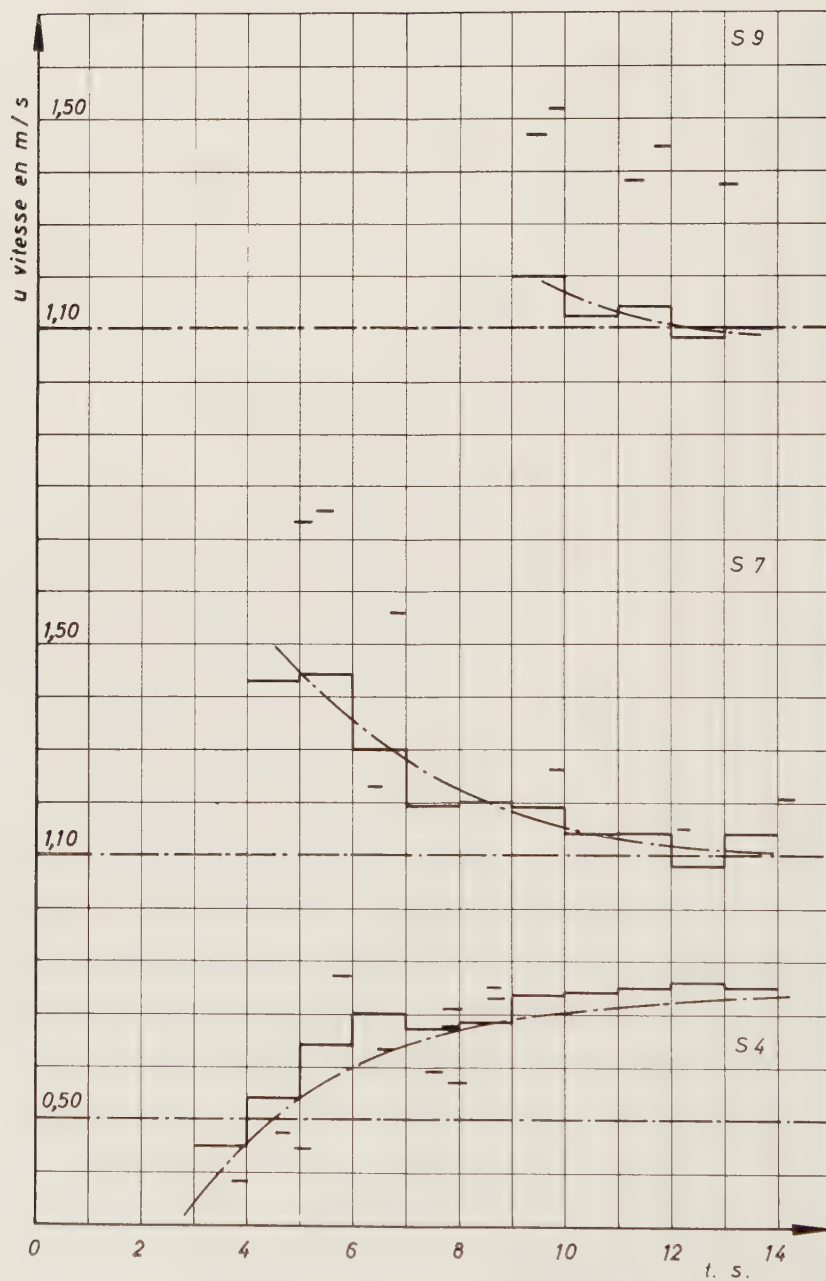


PLANCHE 27

Vitesses de surface en fonction du temps
(Comparaison avec les vitesses moyennes correspondantes)

ESSAI 5 B

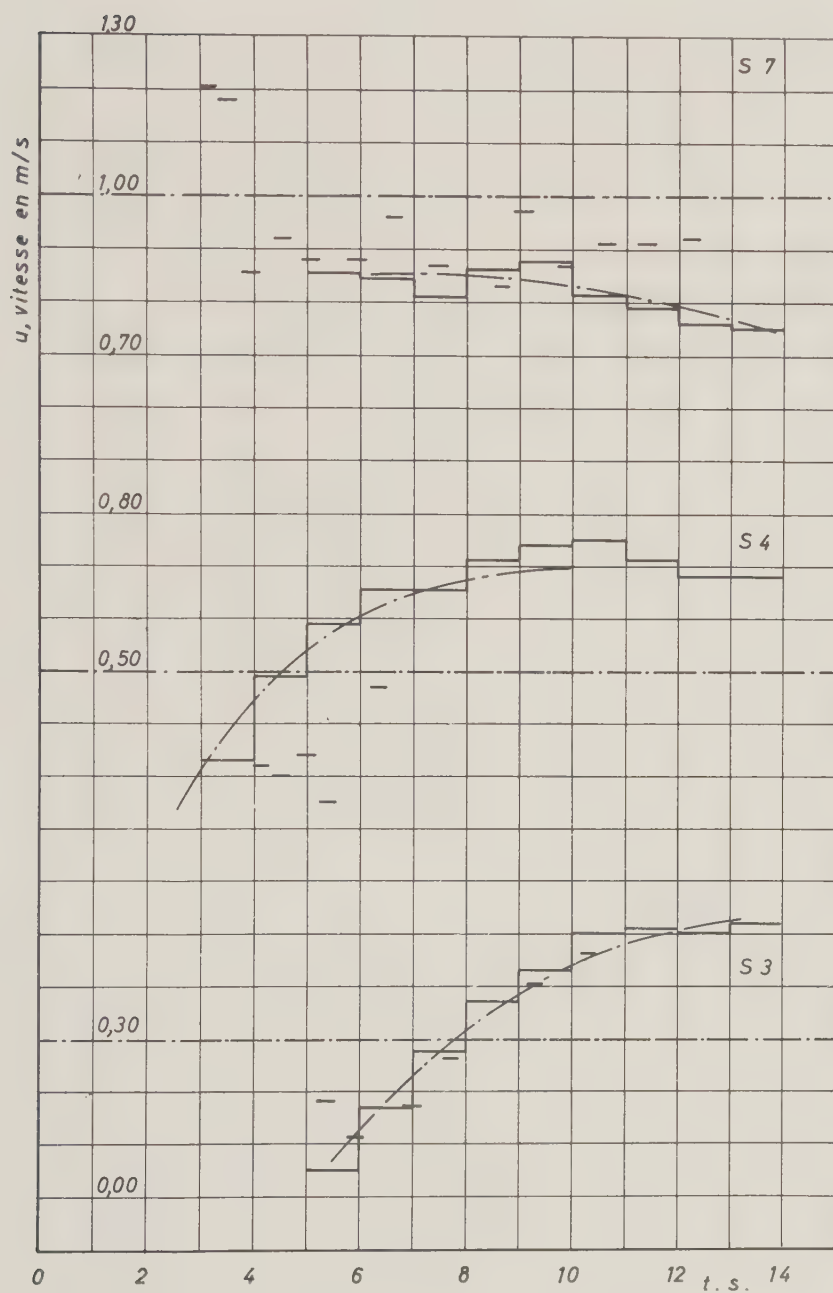
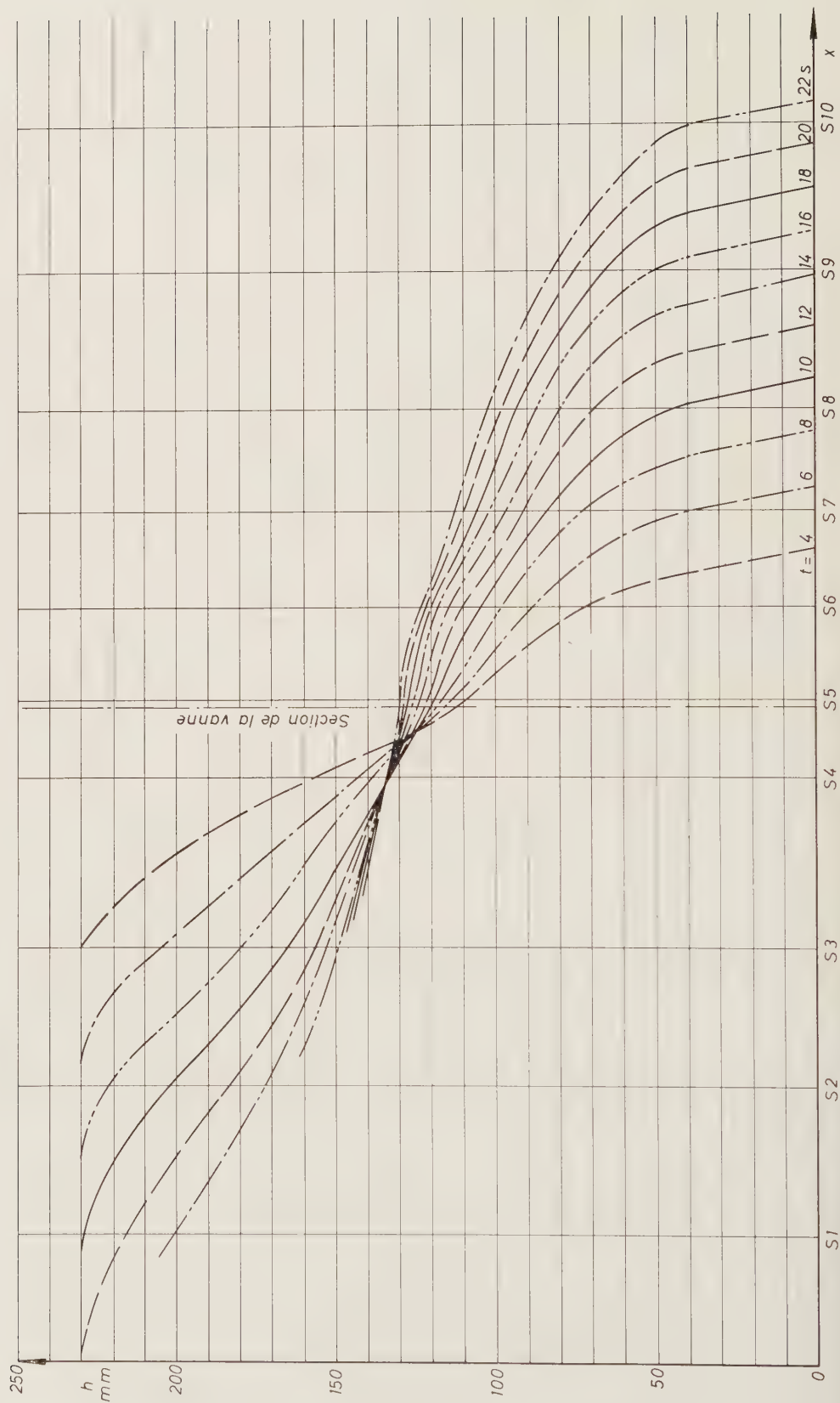


PLANCHE 28

Lignes d'eau instantanées (du temps $t = 4$ s au temps $t = 22$ s)

ESSAI 1 C



Lignes d'eau instantanées (du temps $t = 3$ s au temps $t = 14$ s)

ESSAI 4 C

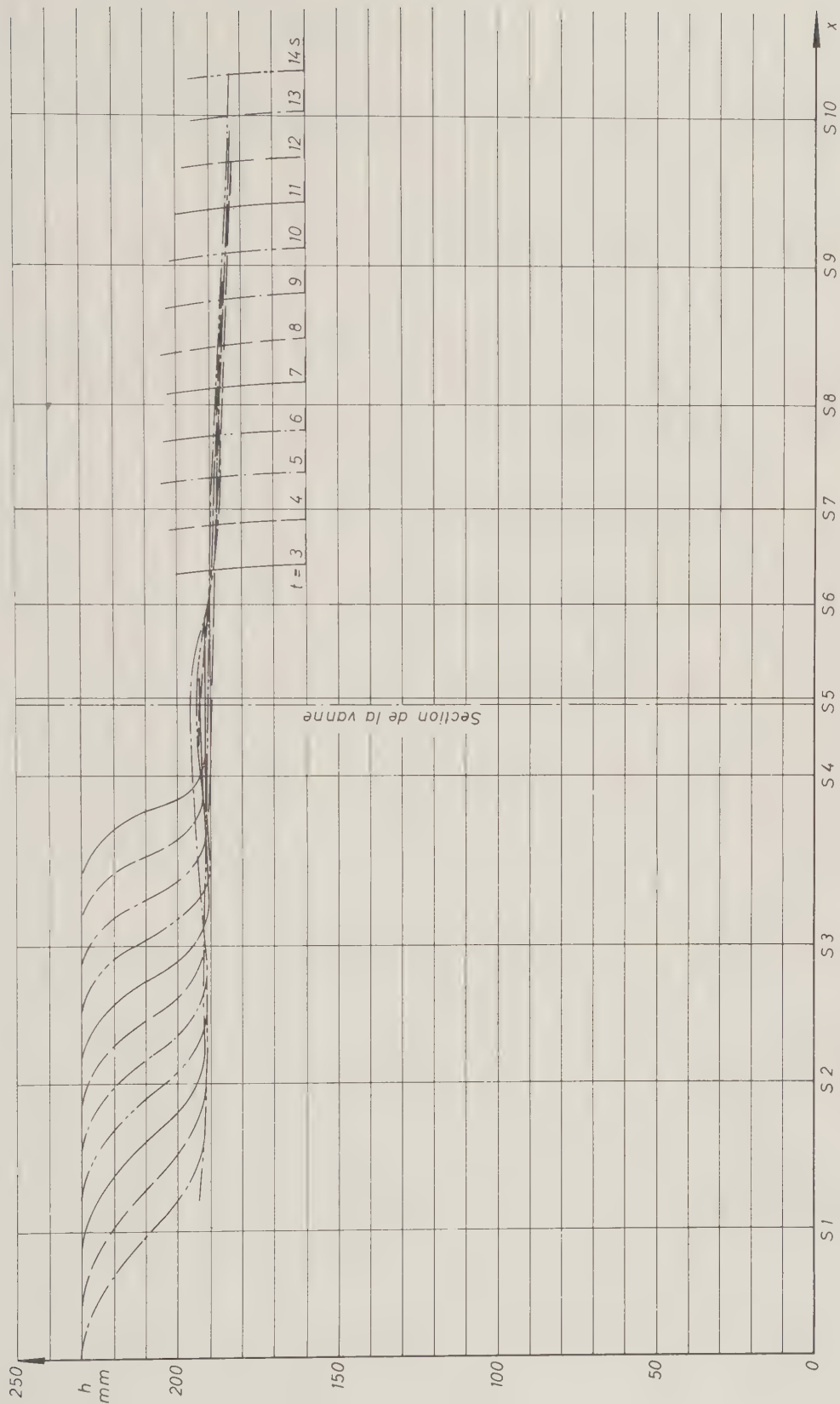


PLANCHE 30

Vitesse moyennes en fonction du temps

ESSAI 1 C

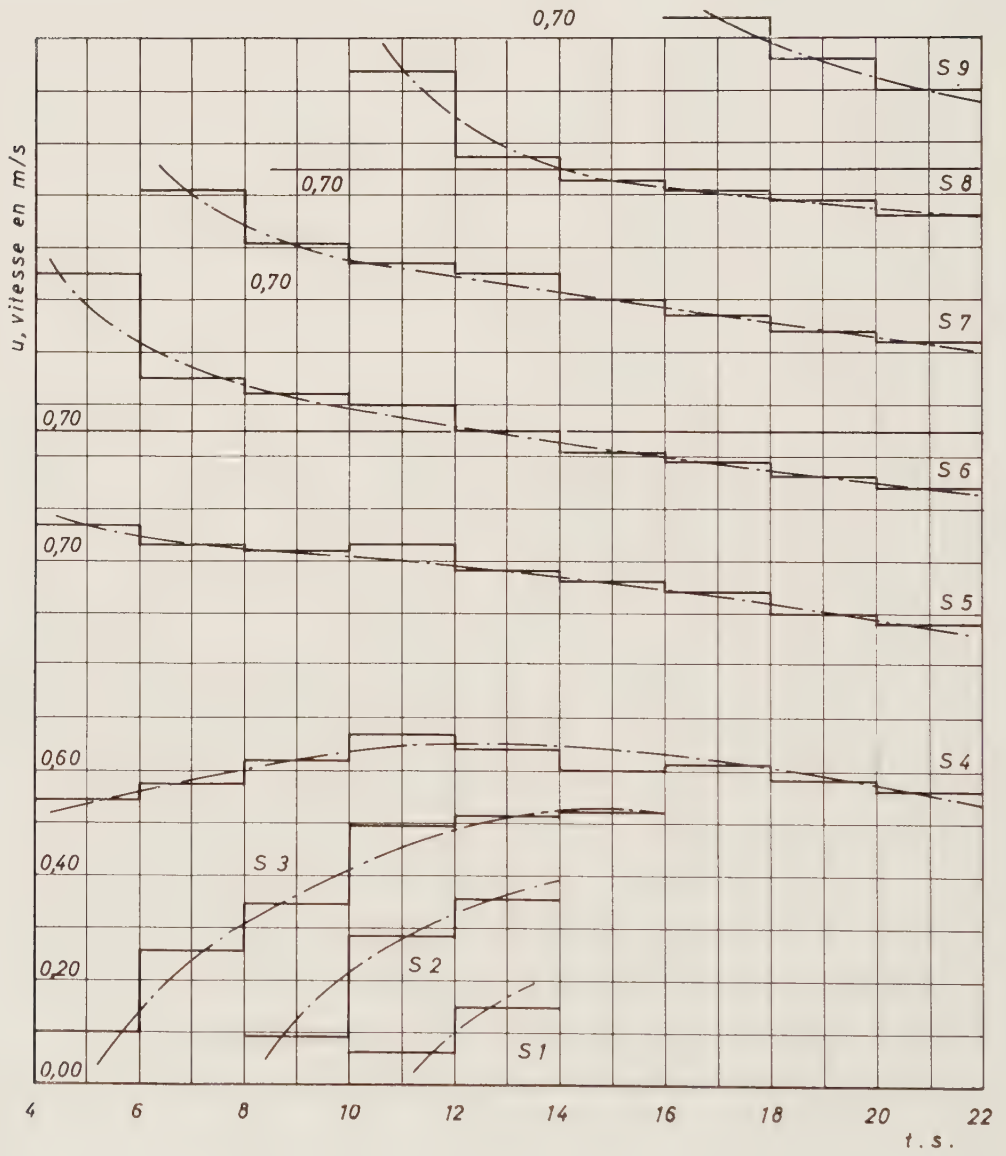


PLANCHE 31

Vitesses moyennes en fonction du temps

ESSAI 4 C

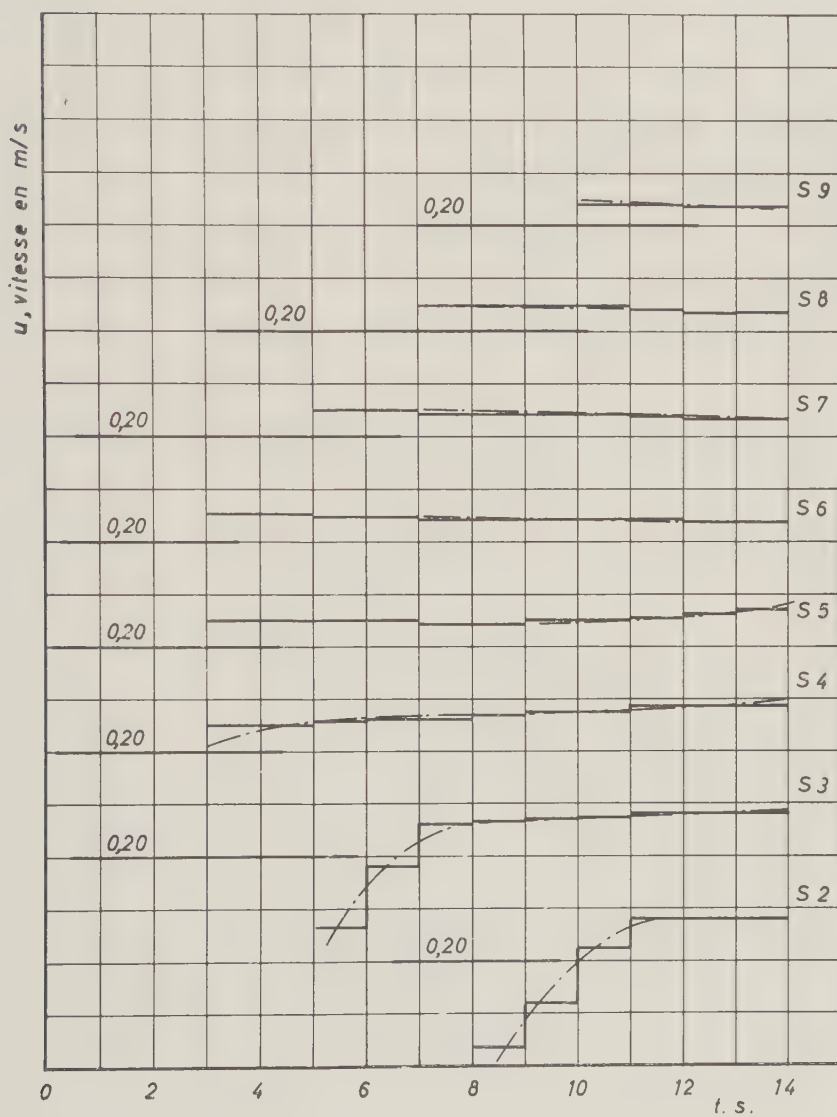


PLANCHE 32

Trajectoire du front d'onde
(Présentation adimensionnelle)

ESSAI 1 B

$$\eta_0 = 0,00$$

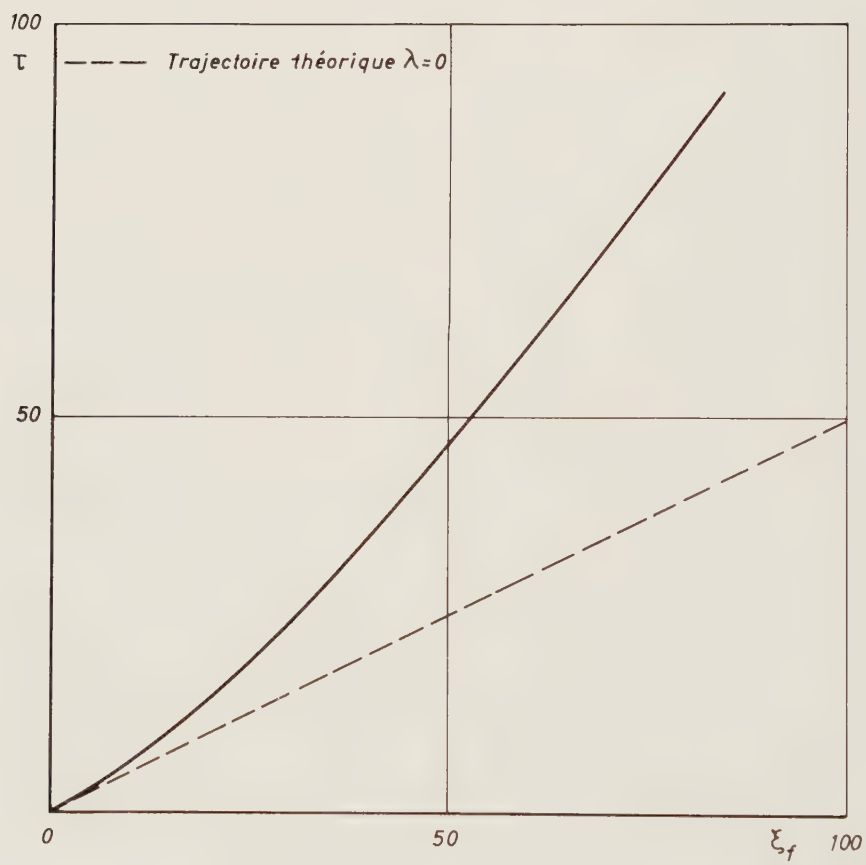


PLANCHE 33

Trajectoires des fronts d'onde (présentation adimensionnelle)

ESSAIS 1 B et 8 B

$\eta_0 = 0$ Temps longs

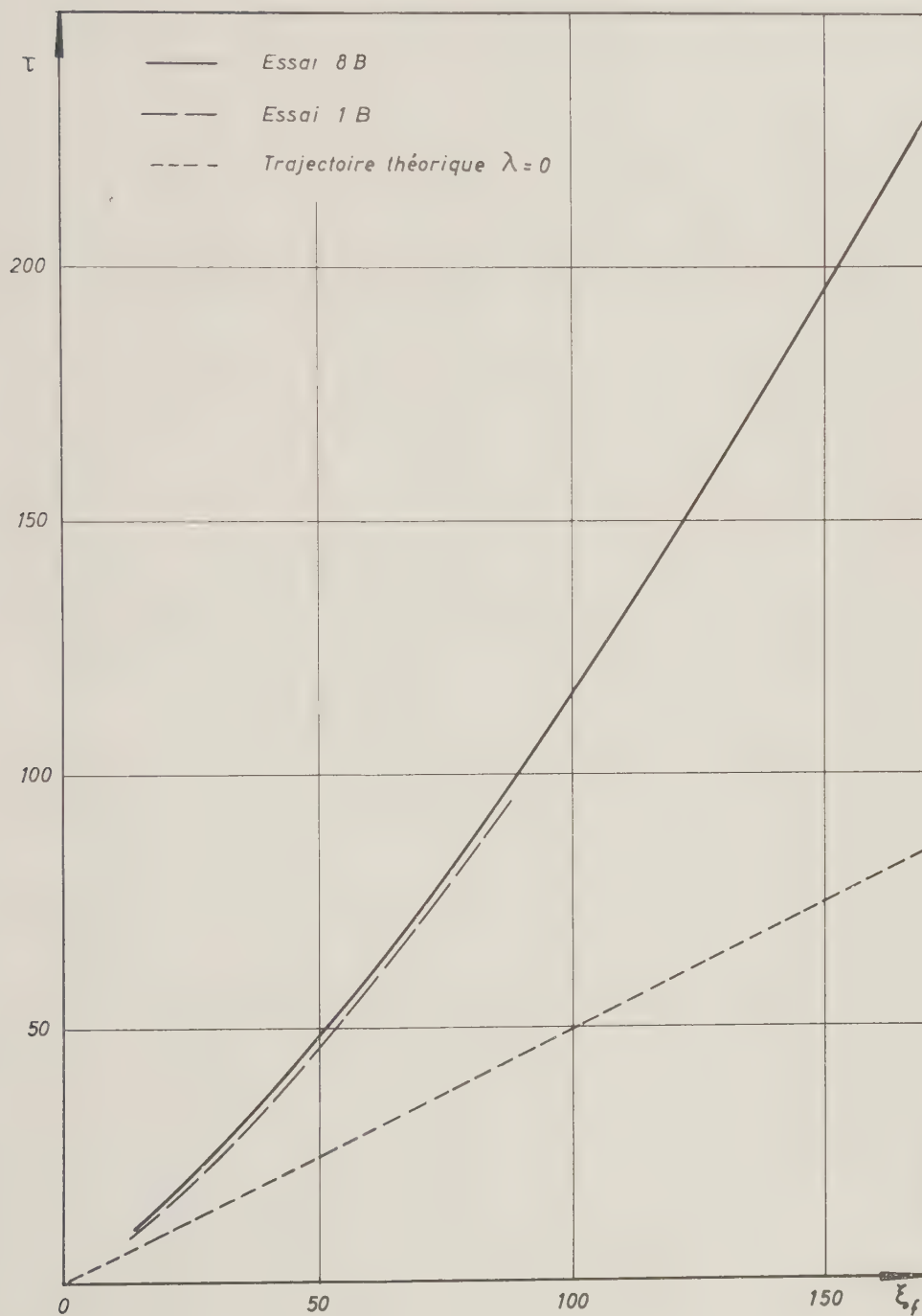


PLANCHE 34

Trajectoire du front d'onde
(Présentation adimensionnelle)

ESSAI 2 B

$$\eta_0 = 0,021$$

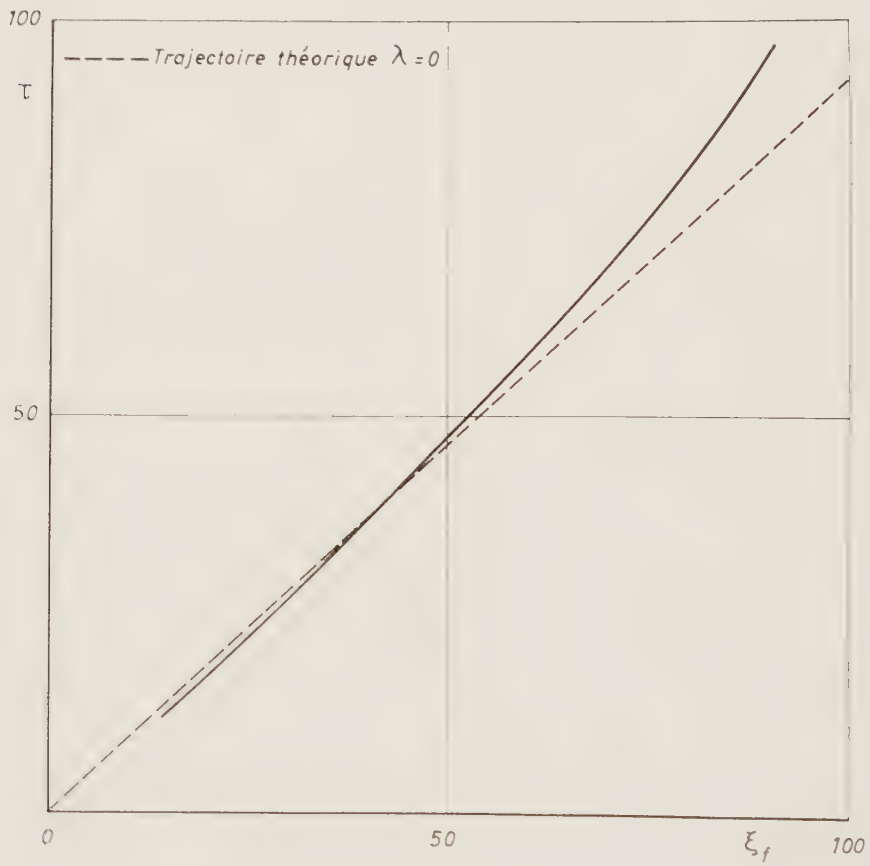


PLANCHE 35

Trajectoire du front d'onde
(Présentation adimensionnelle)

ESSAI 3 B

$$\eta_0 = 0,043$$

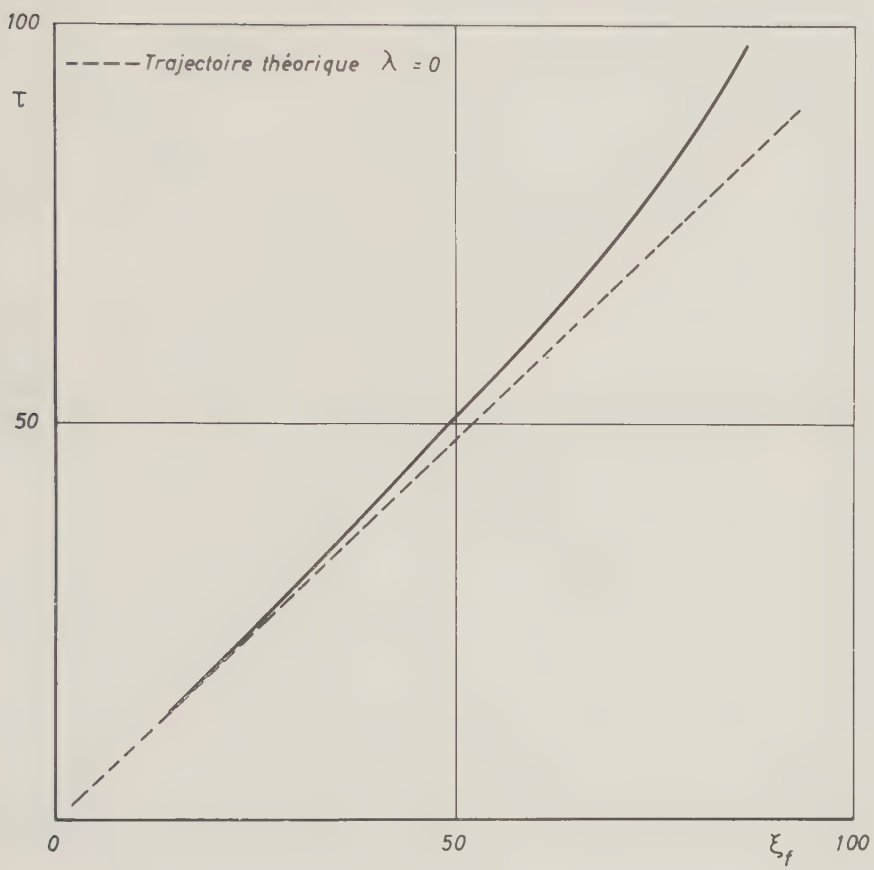


PLANCHE 36

Trajectoire du front d'onde
(Présentation adimensionnelle)

ESSAI 4 B

$$\eta_0 = 0,087$$

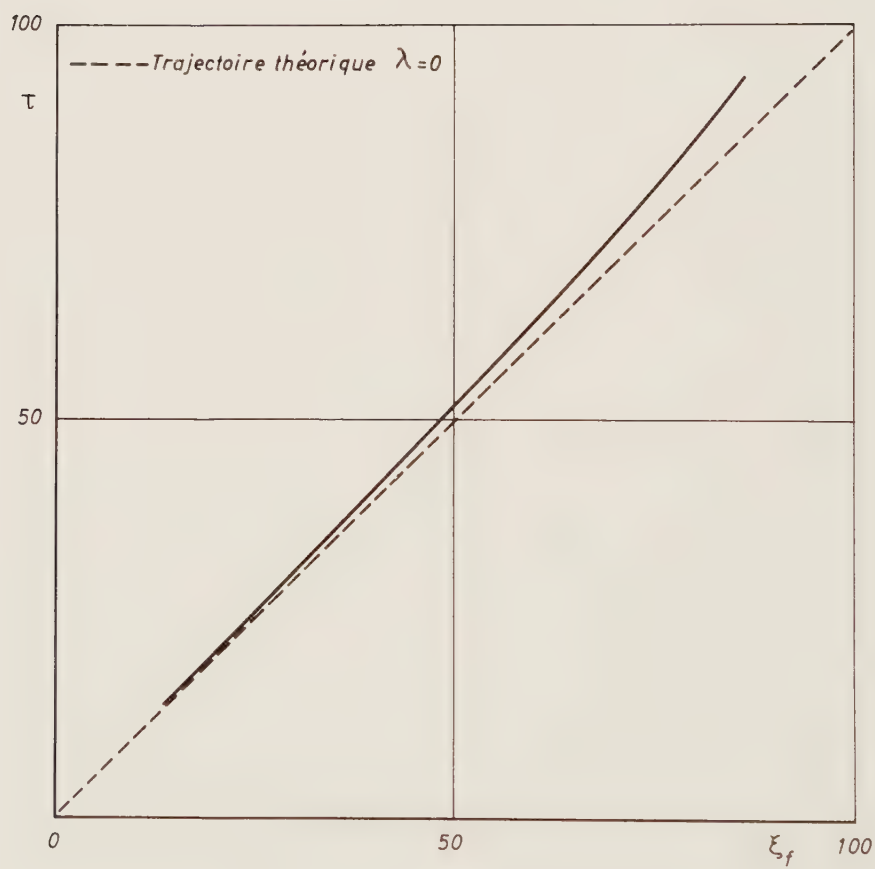


PLANCHE 37

Trajectoire du front d'onde
(Présentation adimensionnelle)

ESSAI 5 B

$$\eta_0 = 0,174$$

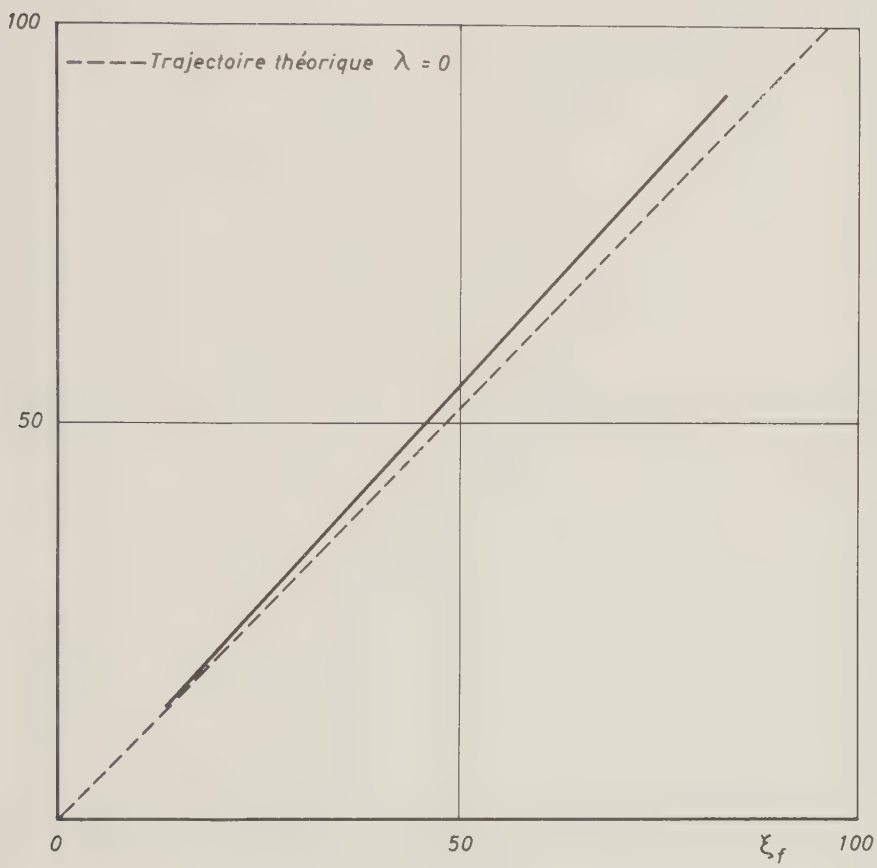


PLANCHE 38

Trajectoire du front d'onde
(Présentation adimensionnelle)

ESSAI 6 B

$\eta_0 = 0,348$

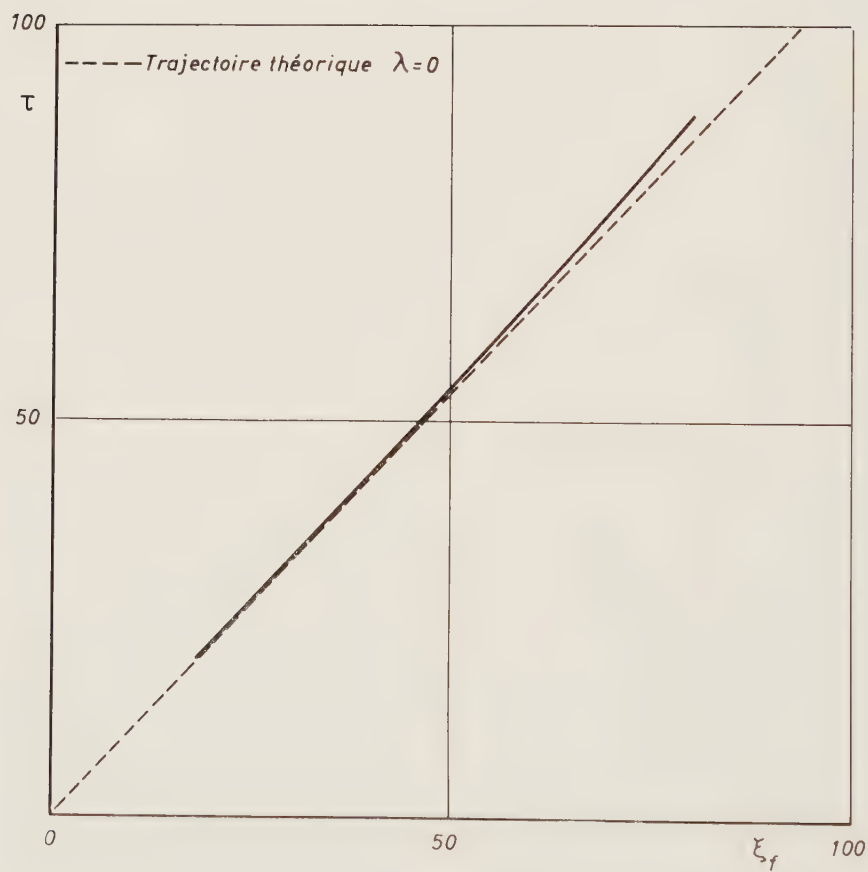


PLANCHE 39

Trajectoire du front d'onde
(Présentation adimensionnelle)

ESSAI 7 B

$\eta_0 = 0,700$

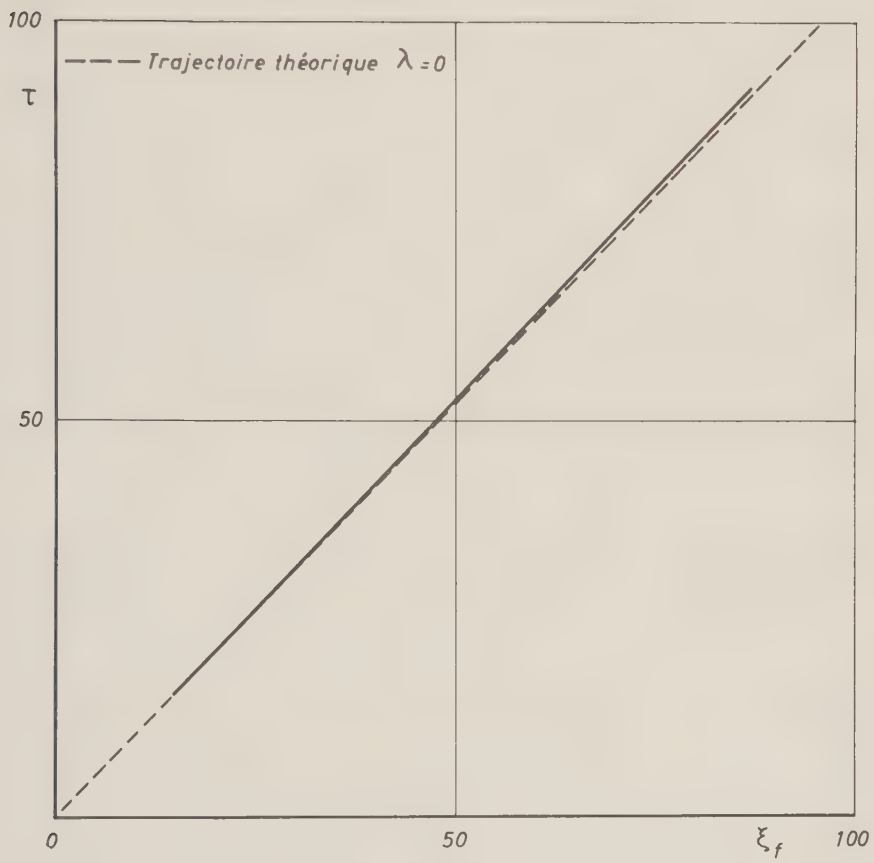


PLANCHE 40

Trajectoires des fronts d'onde (présentation adimensionnelle)

ESSAIS DE DRESSLER (fond lisse)

$\eta_0 = 0$ Temps longs

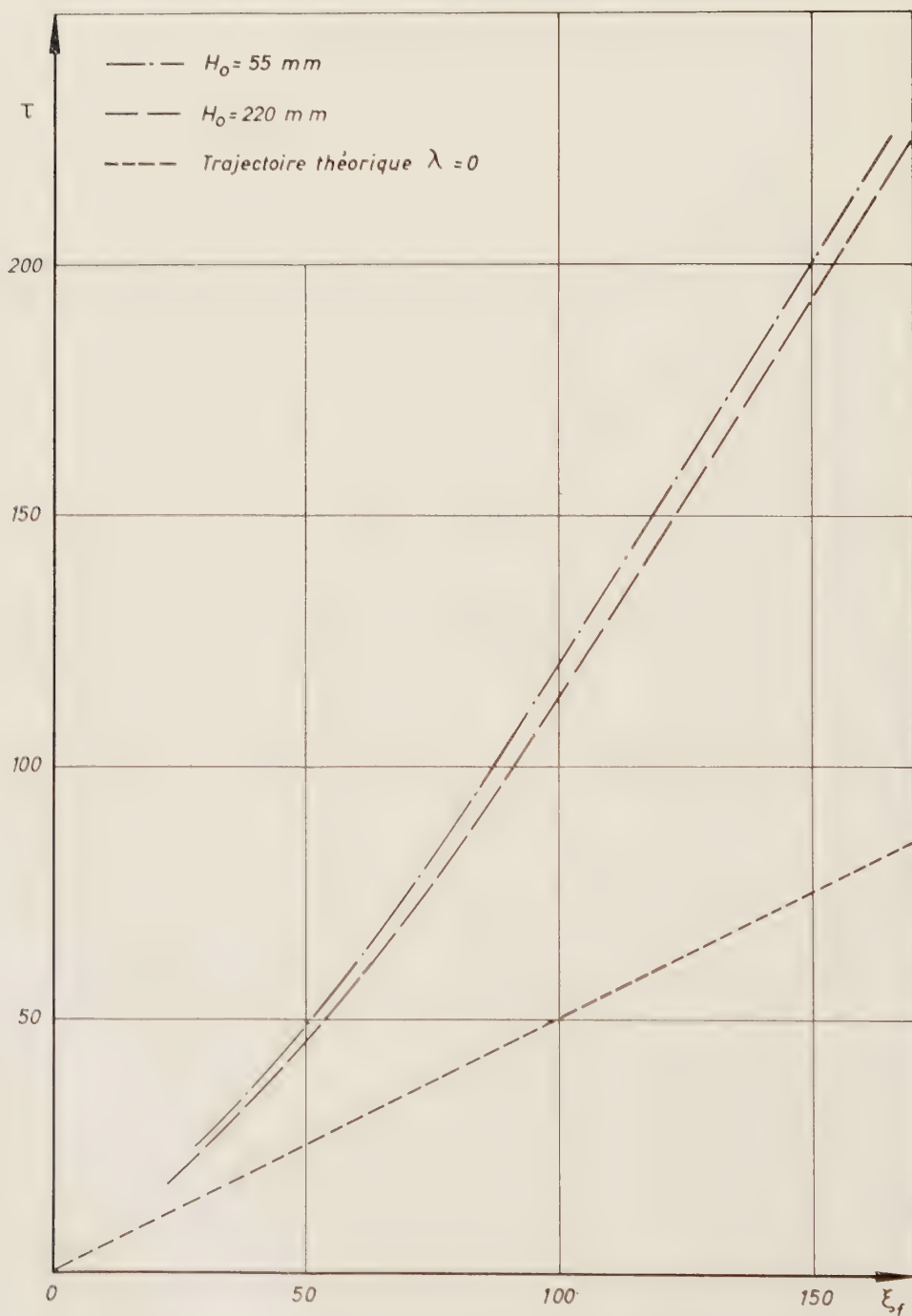


PLANCHE 41

Trajectoires des fronts d'onde (temps courts)

(Présentation adimensionnelle)

ESSAIS DE DRESSLER (fond lisse)

ESSAIS 1 B et 8 B

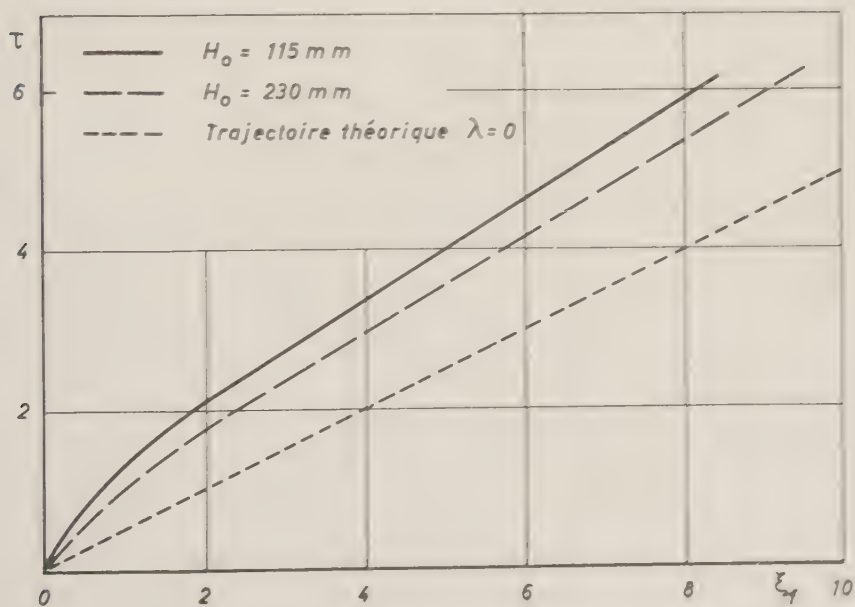
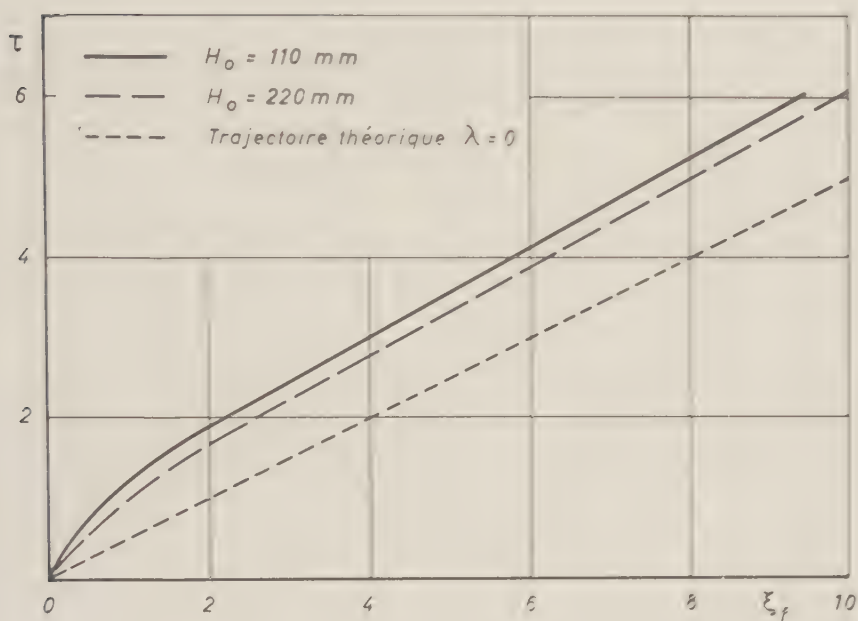


PLANCHE 42

Trajectoire du front d'onde
(Présentation adimensionnelle)

ESSAI 1 C

$\eta_0 = 0,00$

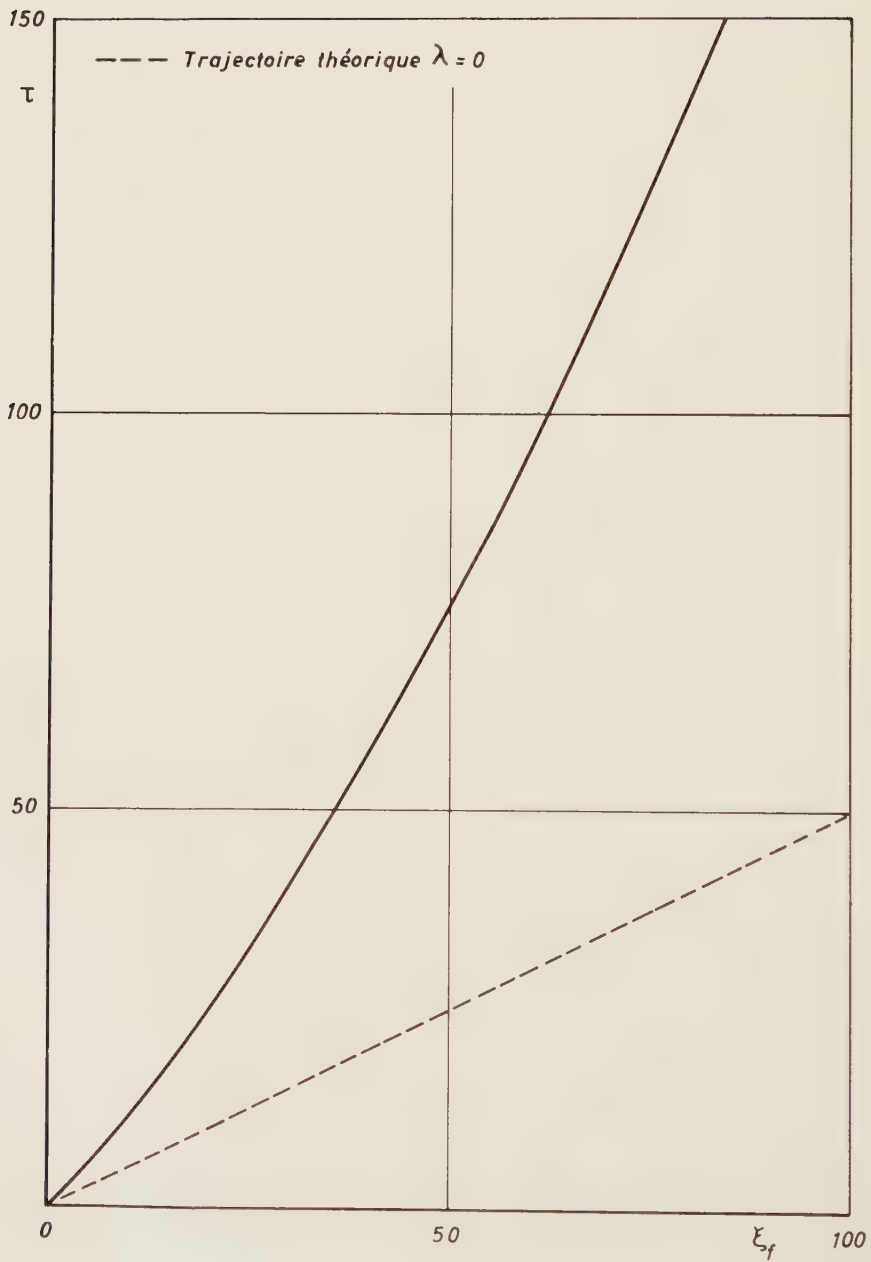


PLANCHE 43

Trajectoire du front d'onde
(Présentation adimensionnelle)

ESSAI 2 C

$\eta_0 = 0,043$

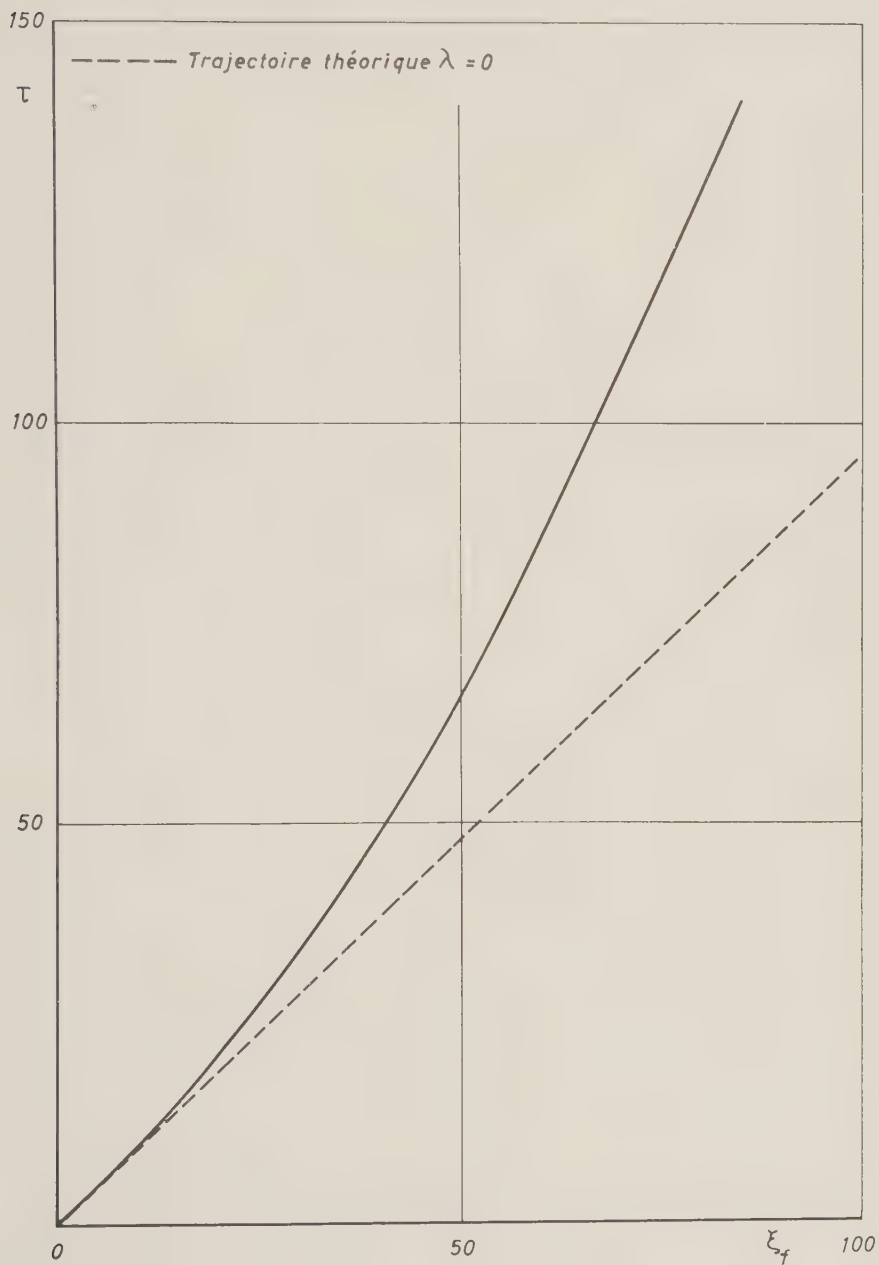


PLANCHE 44

Trajectoire du front d'onde
(Présentation adimensionnelle)

ESSAI 3 C

$\eta_0 = 0,174$

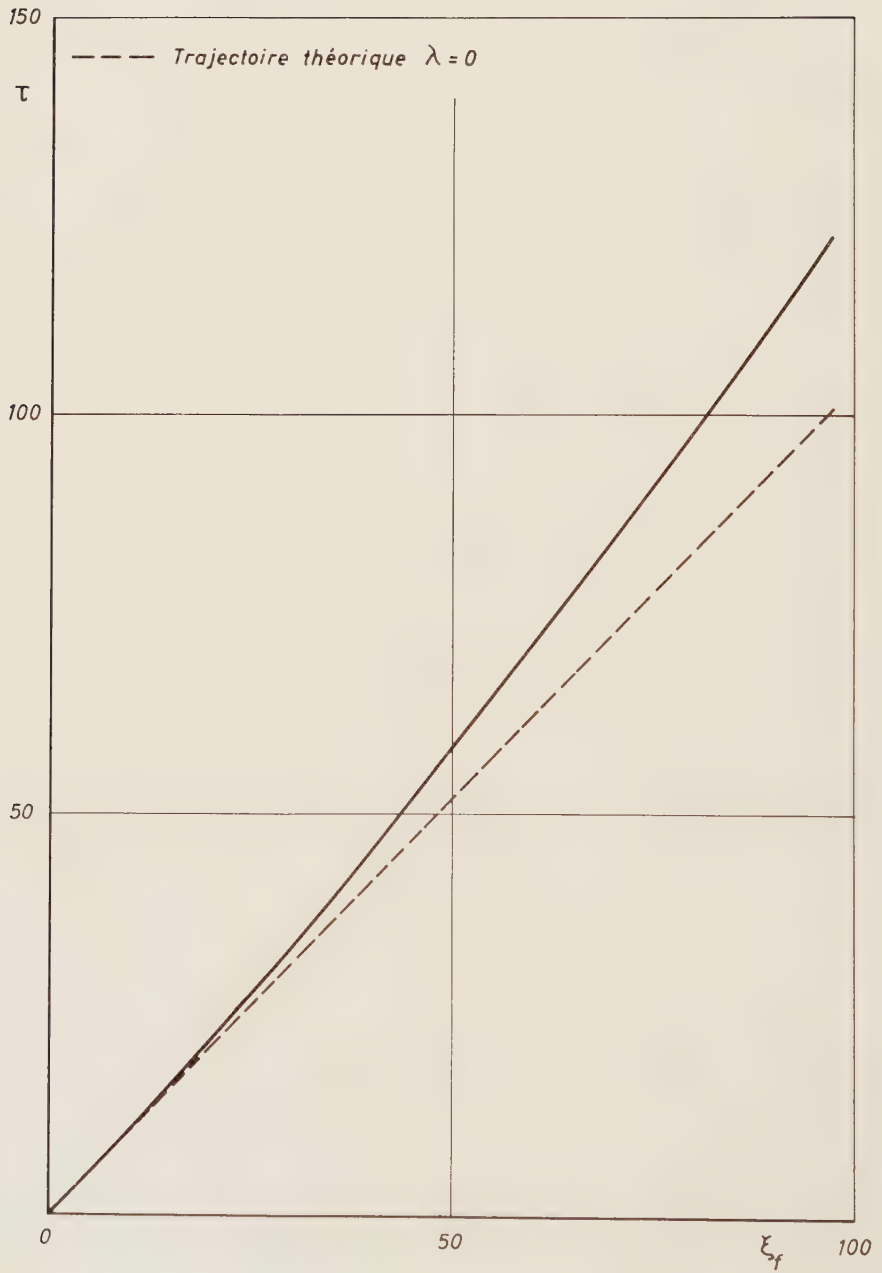


PLANCHE 45

Trajectoire du front d'onde
(Présentation adimensionnelle)

ESSAI 4 C

$\gamma_0 = 0,700$

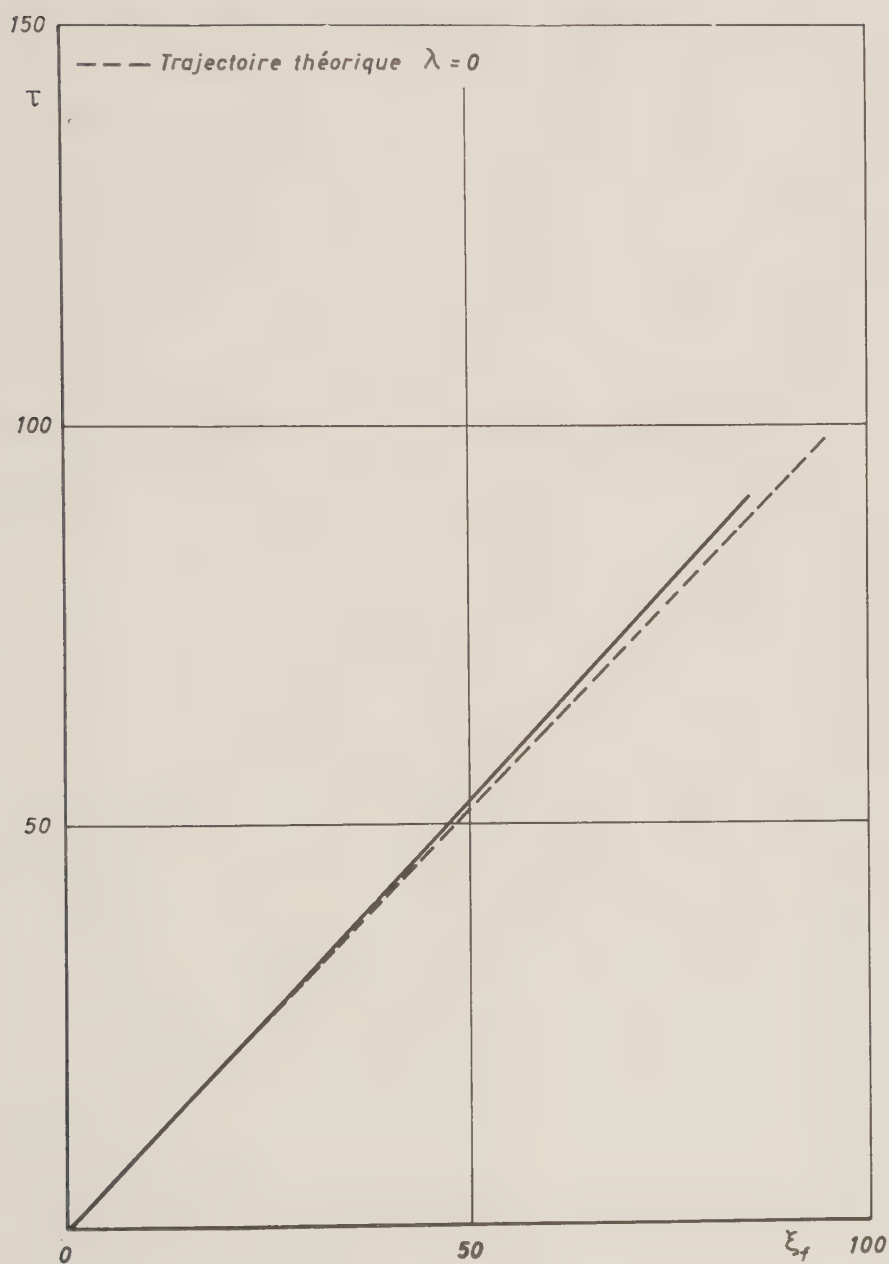


PLANCHE 46

Trajectoire du front d'onde
(Présentation adimensionnelle)

ESSAI de DRESSLER

$$\eta_0 = 0,00$$

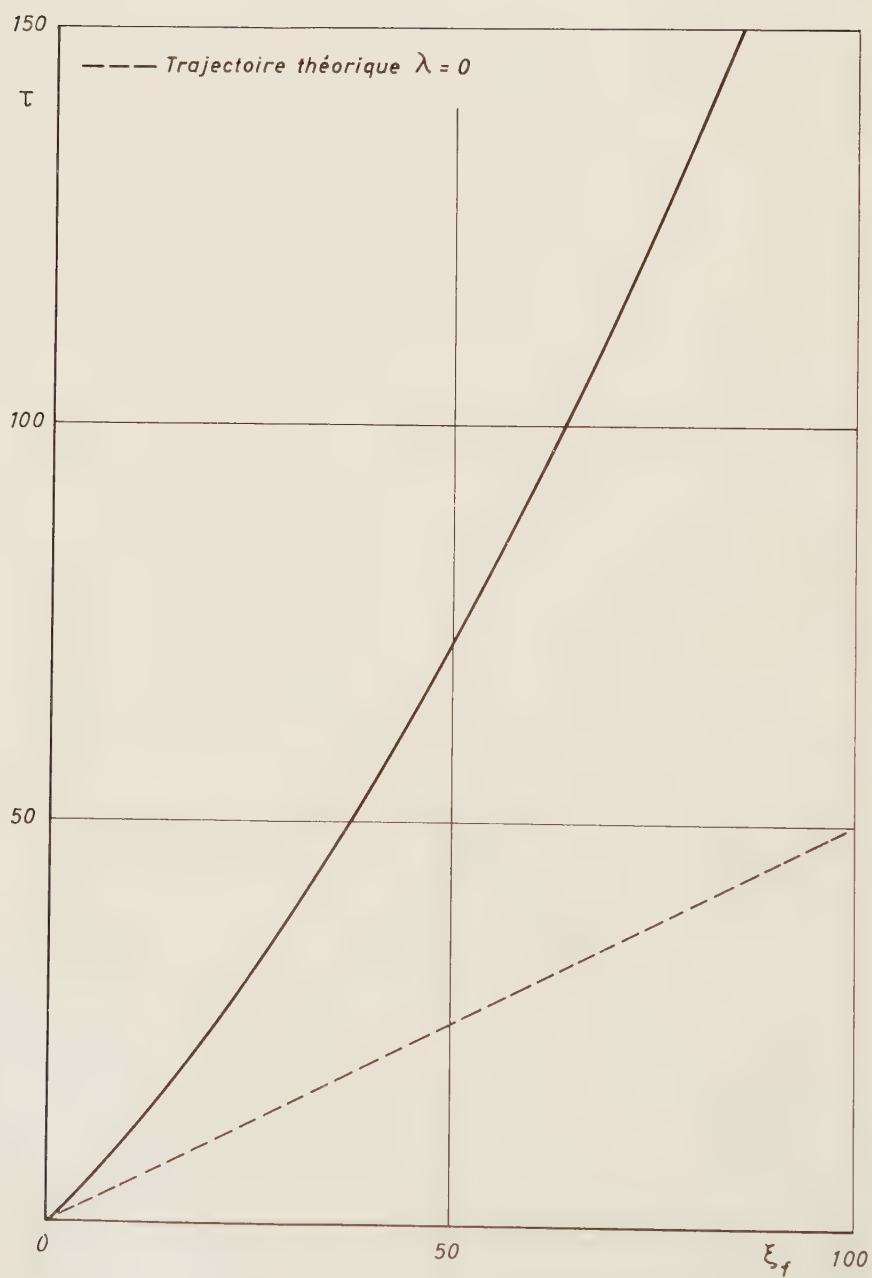


PLANCHE 47

Trajectoire des fronts d'onde (temps courts)
 (Présentation adimensionnelle)

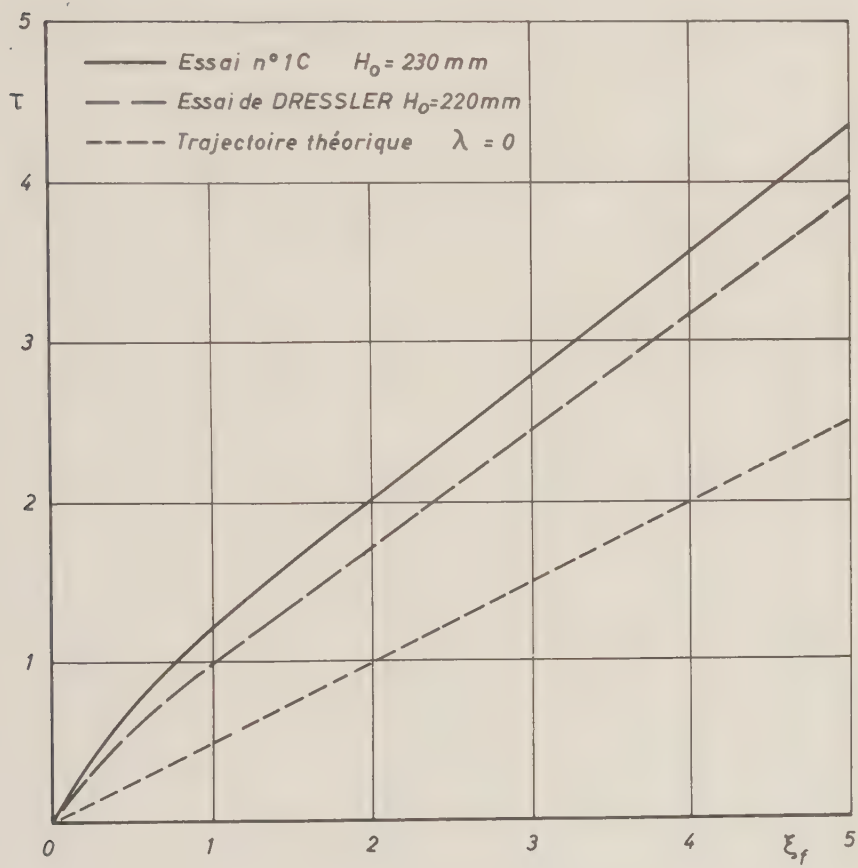


PLANCHE 48

Lignes d'eau (présentation adimensionnelle)

Essai 1 B $\eta_0 = 0$



PLANCHE 49

Lignes d'eau (présentation adimensionnelle)

ESSAI 8 B $\eta_0 = 0$

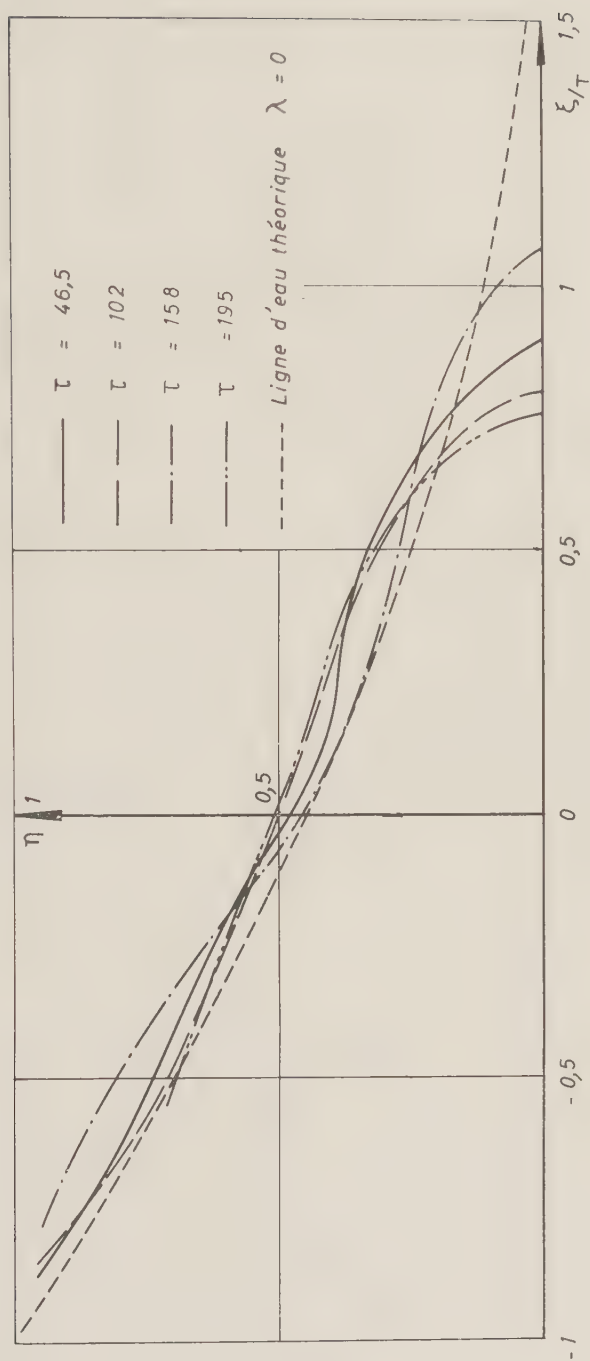


PLANCHE 50

Lignes d'eau (présentation adimensionnelle)

ESSAI 2 B $\gamma_0 = 0,021$ 

PLANCHE 51

Lignes d'eau (présentation adimensionnelle)
Essai 3 B $\gamma_0 = 0,043$

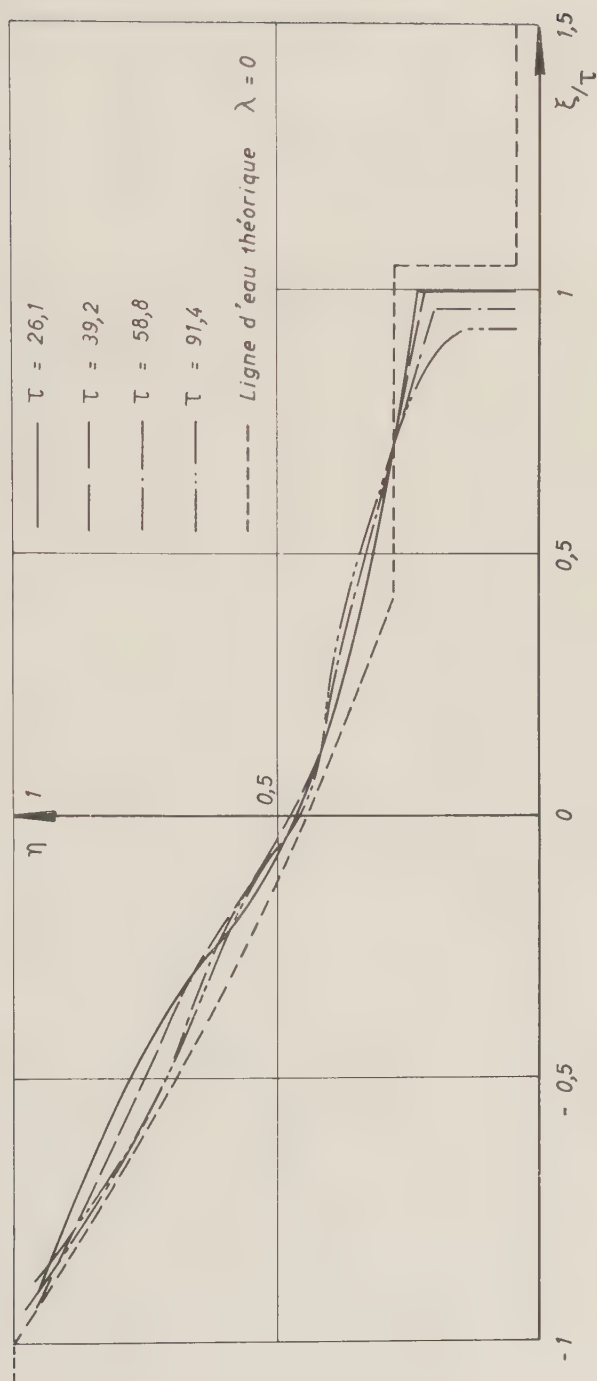


PLANCHE 52

Lignes d'eau (présentation adimensionnelle)

ESSAI 4 B $\eta_0 = 0,087$



PLANCHE 53

Lignes d'eau (présentation adimensionnelle)

Essai 5 B $\gamma_0 = 0,174$

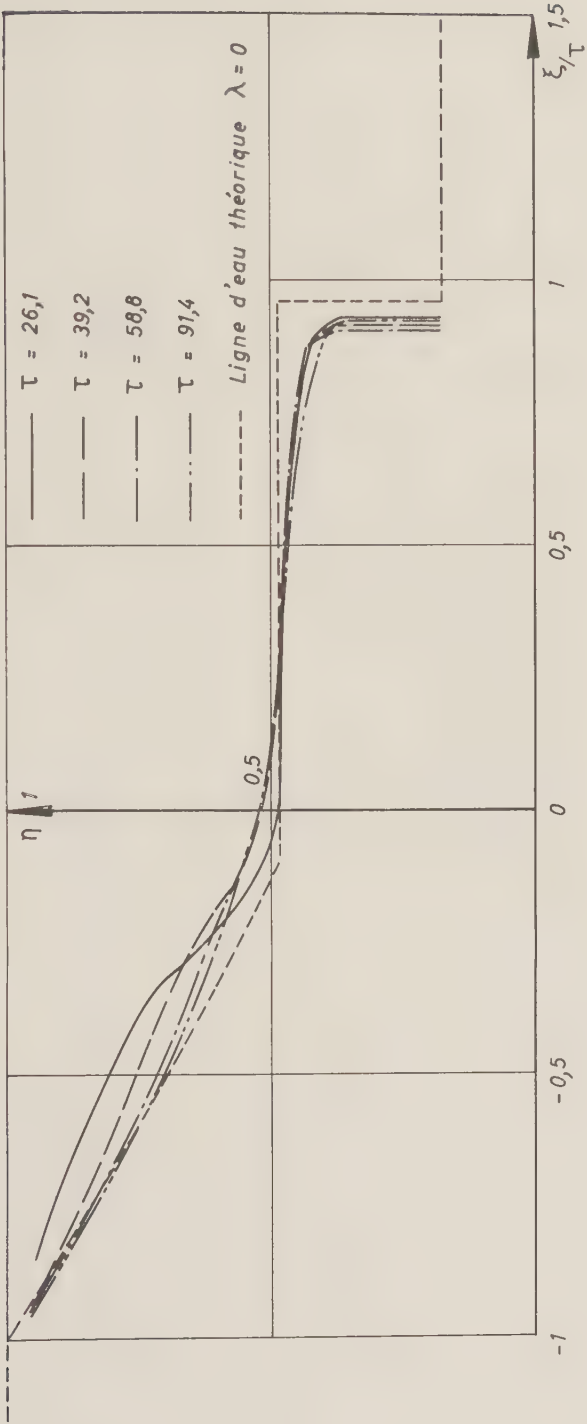


PLANCHE 54

Lignes d'eau (présentation adimensionnelle)

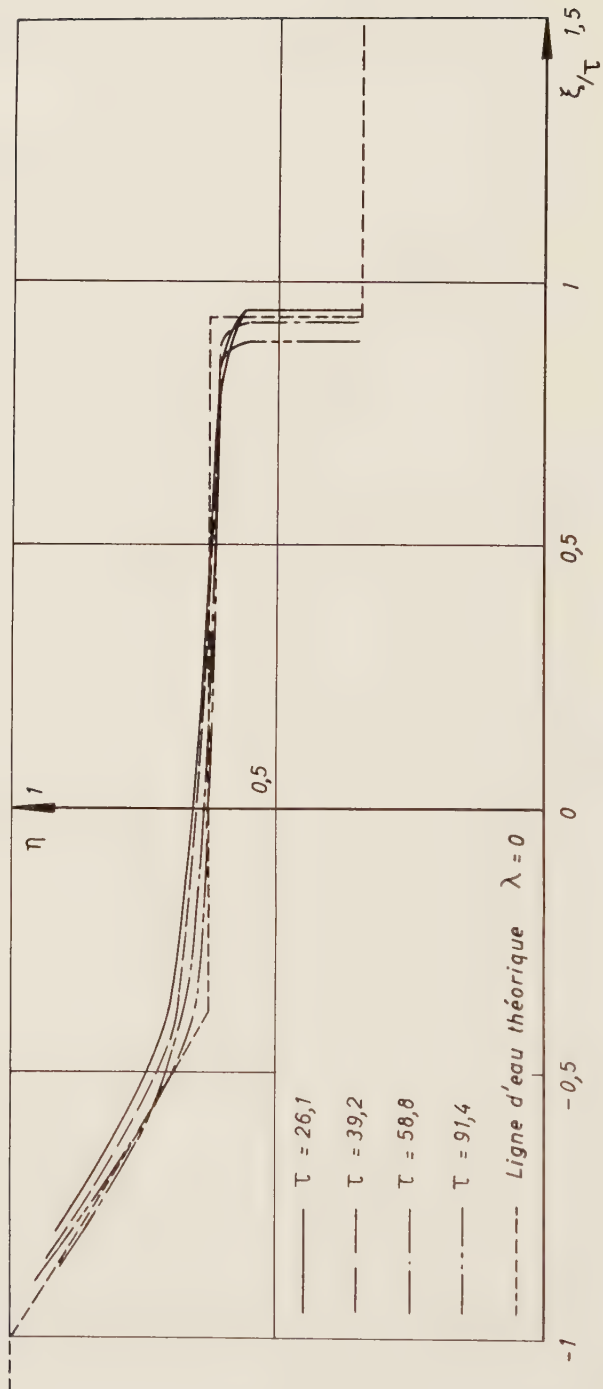
ESSAI 6 B $\gamma_0 = 0,348$ 

PLANCHE 55

Lignes d'eau (présentation adimensionnelle)

ESSAI 7 B $\eta_0 = 0,700$

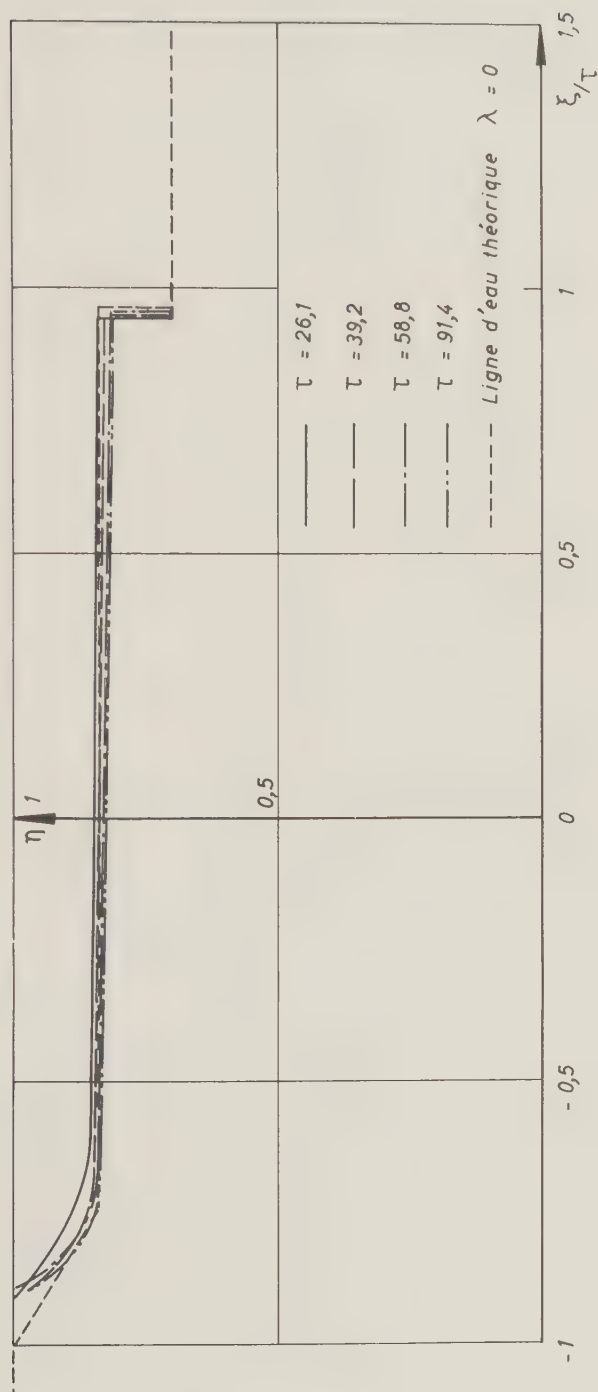


PLANCHE 56

Lignes d'eau (présentation adimensionnelle)

ESSAIS de DRESSLER

$\eta_0 = 0$ Retenue initiale : $H_0 = 220$ mm

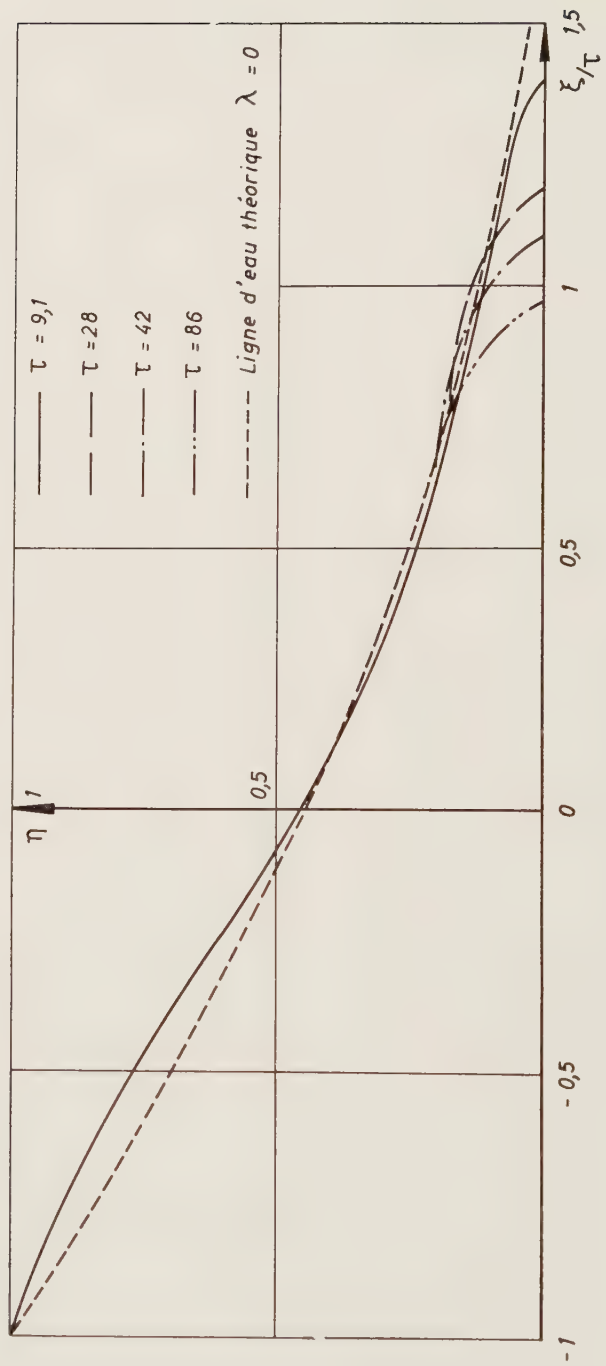


PLANCHE 57

Lignes d'eau (présentation adimensionnelle)

ESSAIS de DRESSLER

$\eta_0 = 0$ Retenue initiale : $H_0 = 110$ mm

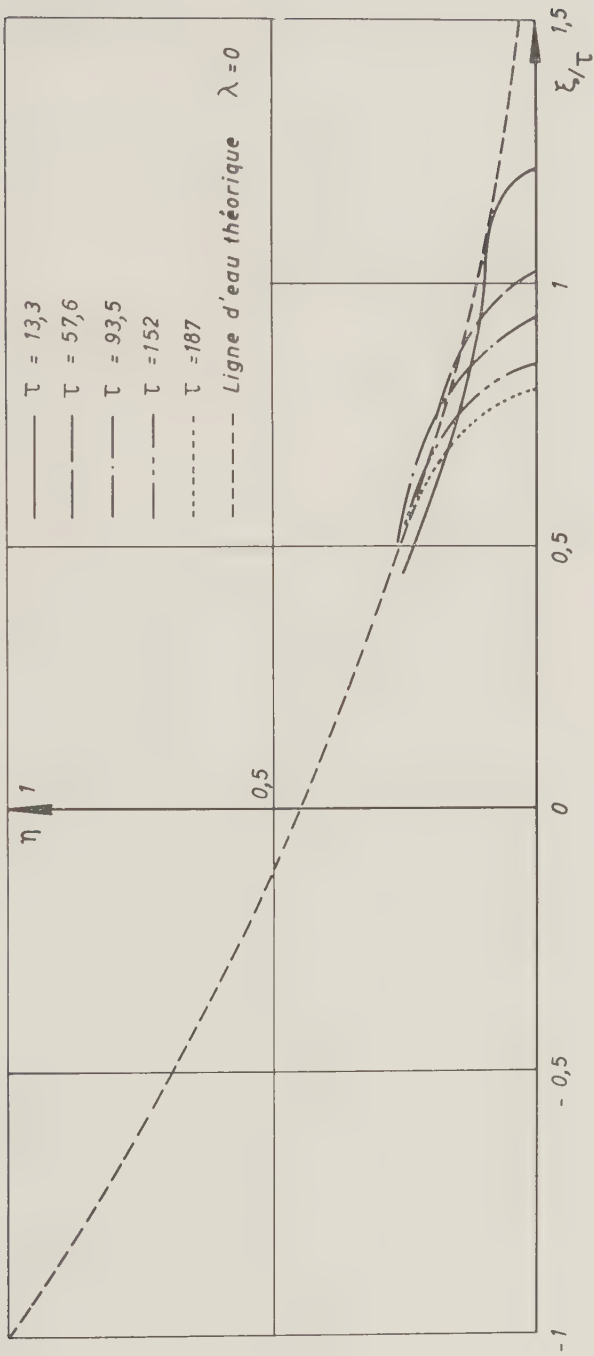


PLANCHE 58

Lignes d'eau (présentation adimensionnelle)

ESSAI 1 C $\gamma_0 = 0$

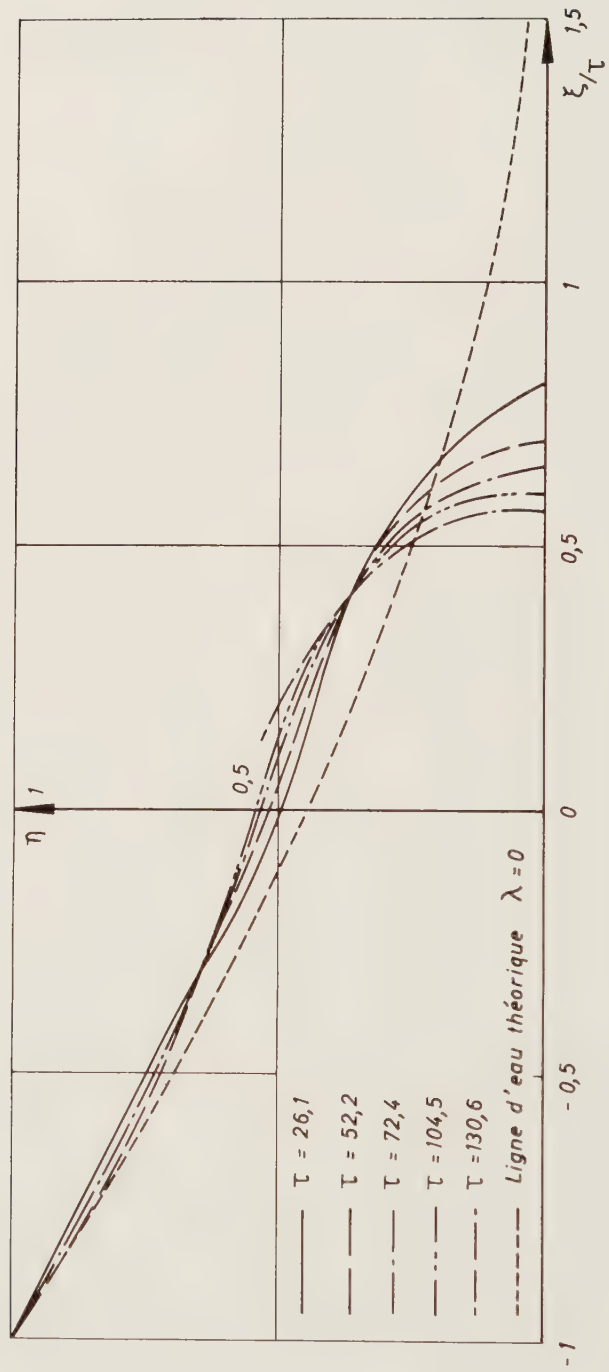


PLANCHE 59

Lignes d'eau (présentation adimensionnelle)

Essai 2 C $\gamma_0 = 0,043$

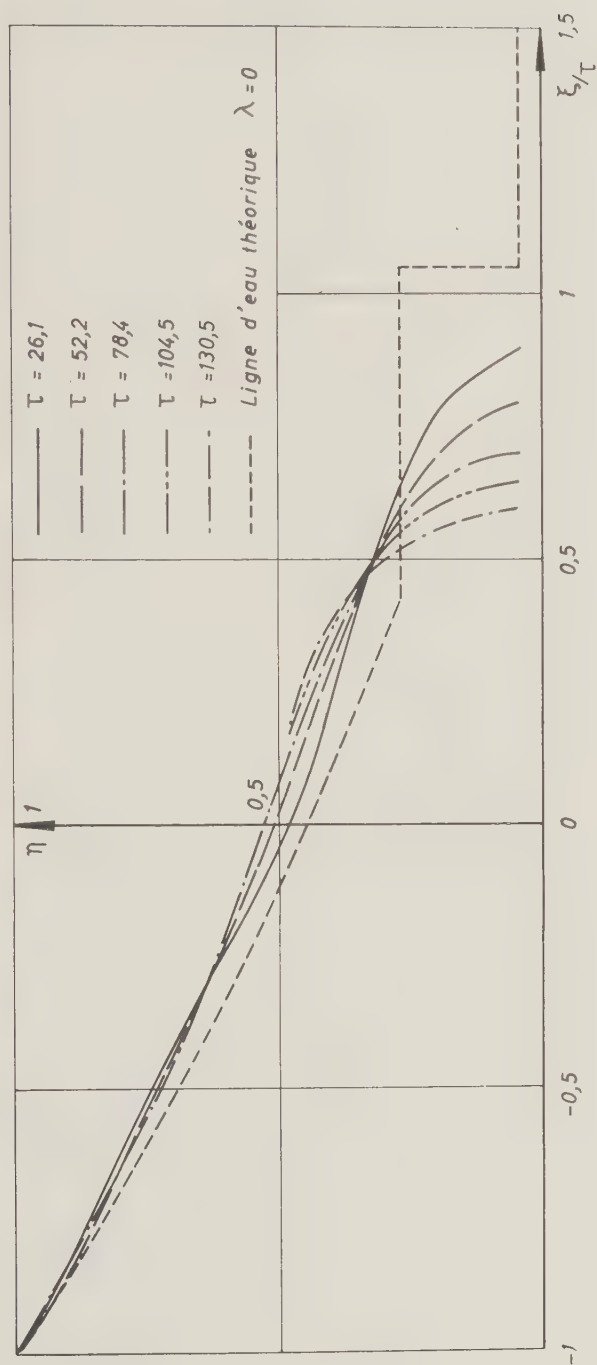


PLANCHE 60

Lignes d'eau (présentation adimensionnelle)

ESSAI 3 C $\gamma_0 = 0,174$

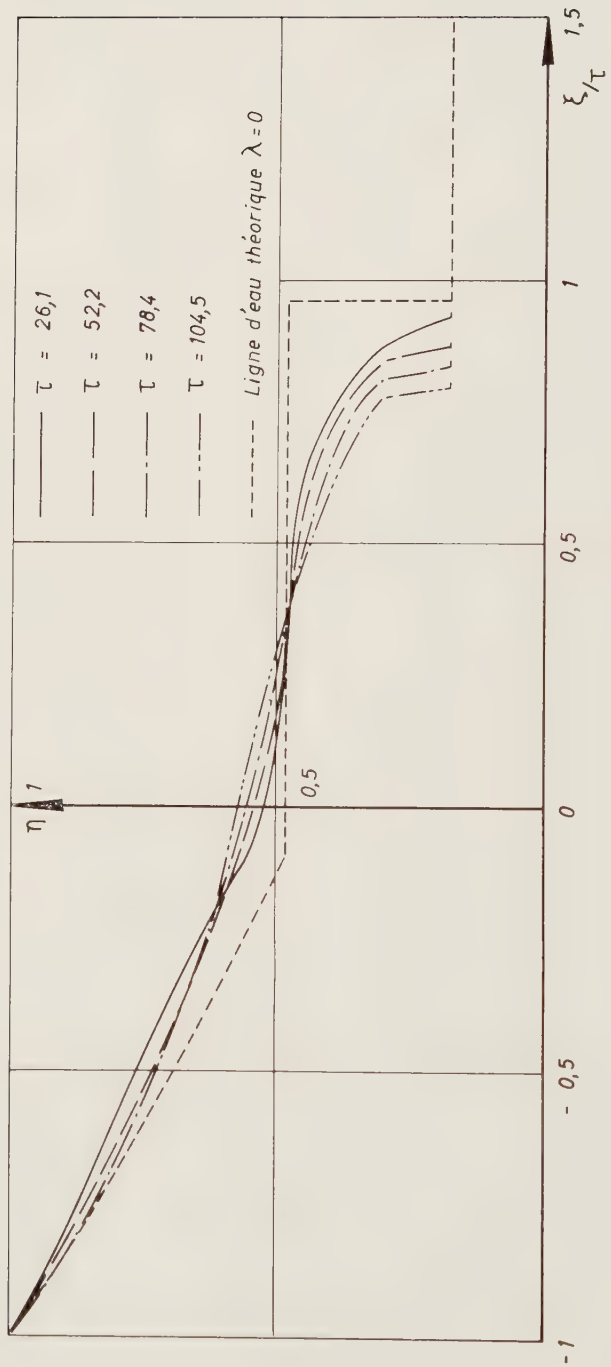


PLANCHE 61

Lignes d'eau (présentation adimensionnelle)

ESSAI 4 C $\eta_0 = 0,700$

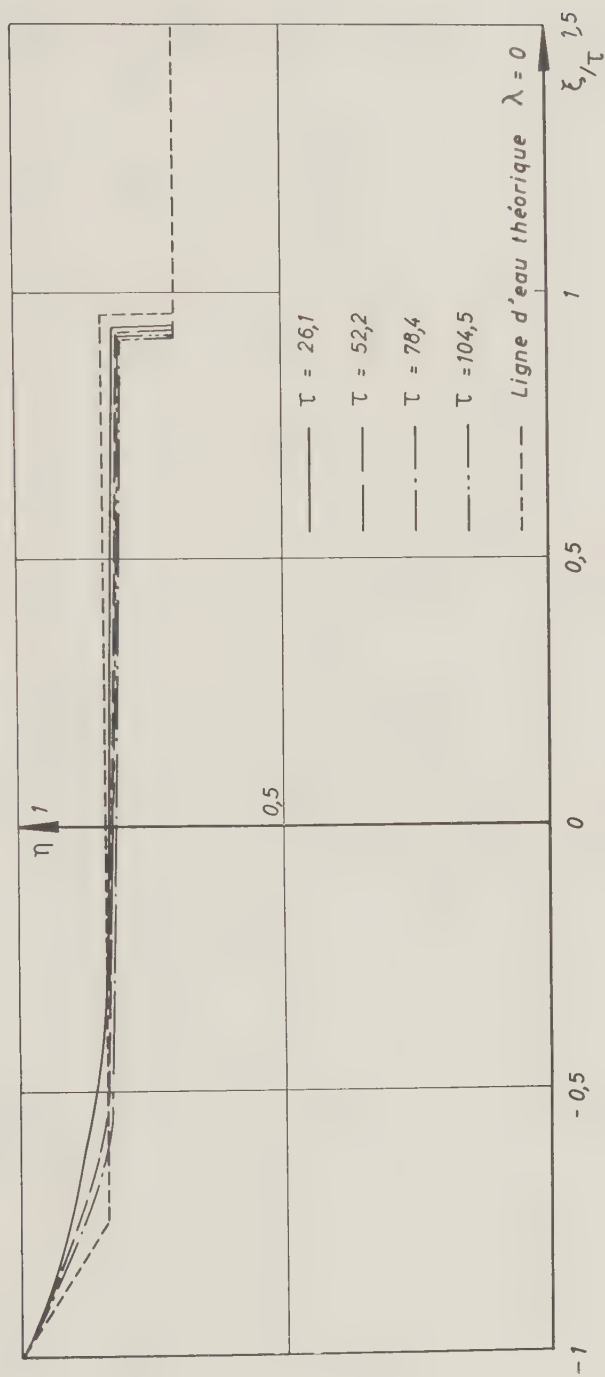


PLANCHE 62

Lignes d'eau (présentation adimensionnelle)

ESSAI de DRESSLER $\gamma_0 = 0$

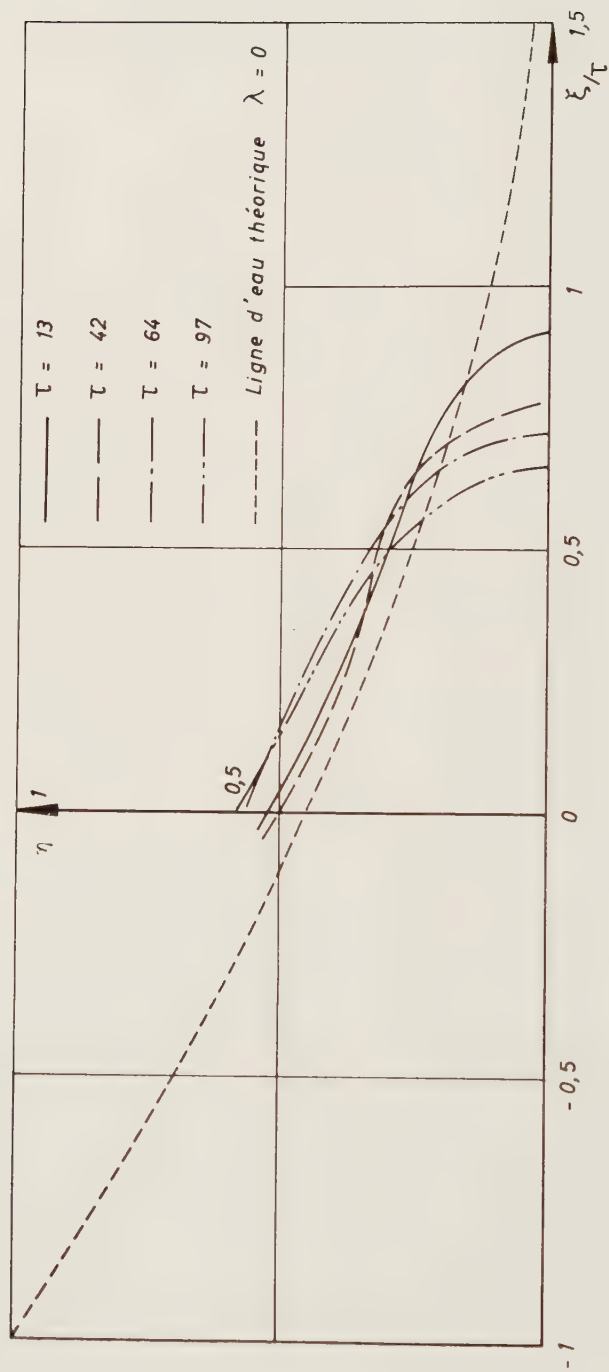


PLANCHE 63

Répartitions longitudinales des vitesses (présentation adimensionnelle)

ESSAI 1 B $\eta_0 = 0$

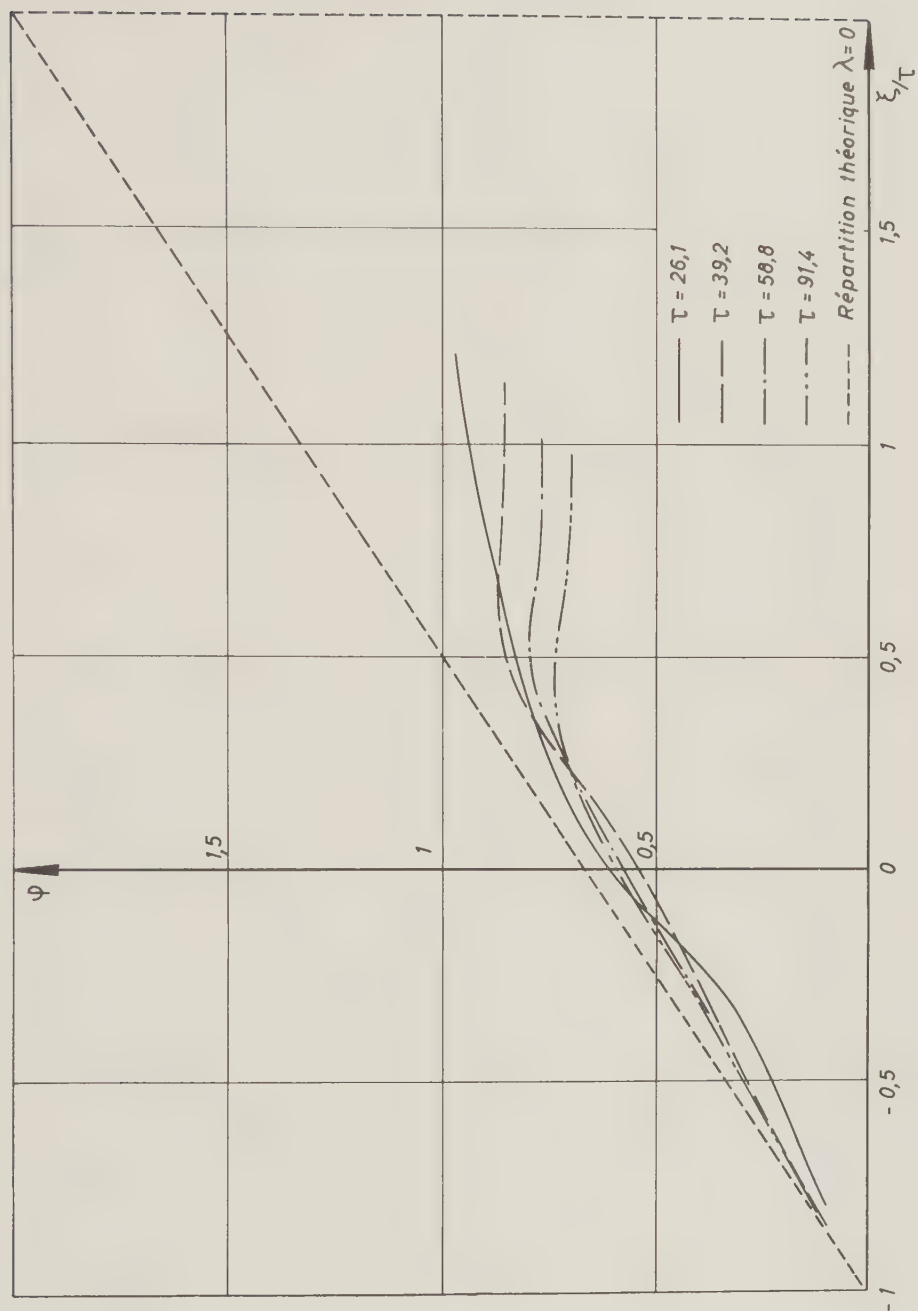
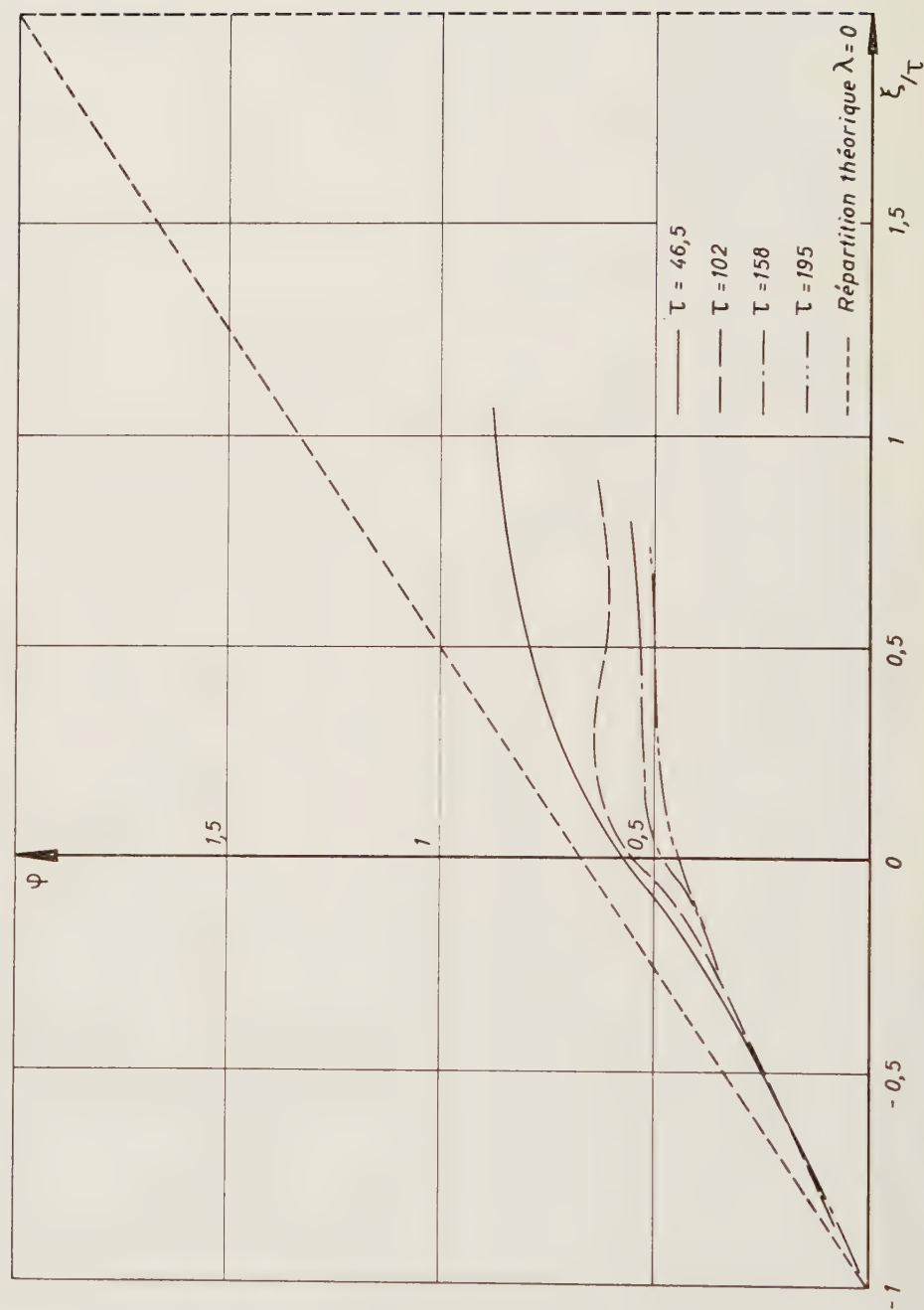


PLANCHE 64

Répartitions longitudinales des vitesses (présentation adimensionnelle)

ESSAI 8 B $\tau_0 = 0$



Répartitions longitudinales des vitesses (présentation adimensionnelle)

ESSAI 2 B $\eta_0 = 0,021$

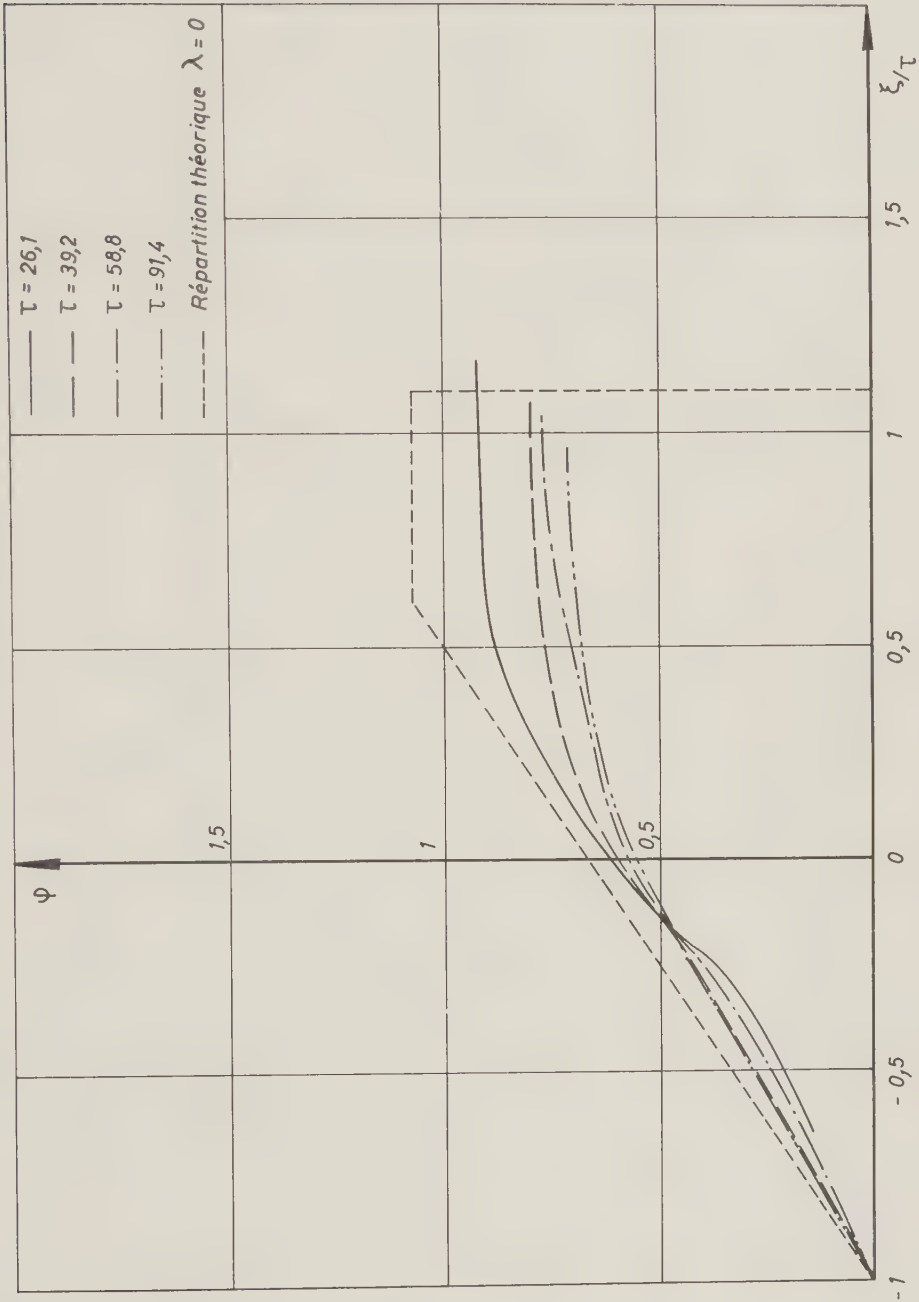
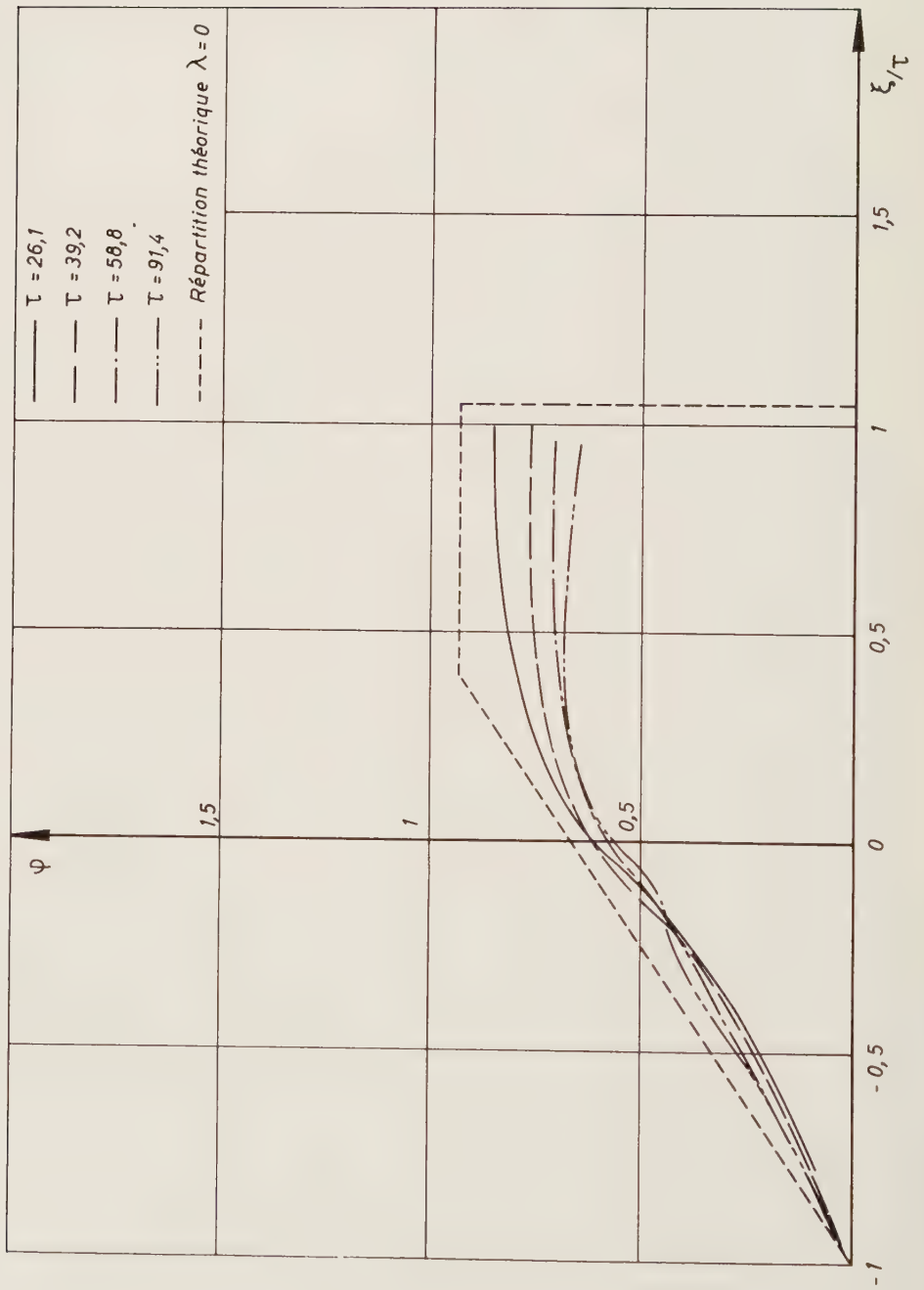


PLANCHE 66

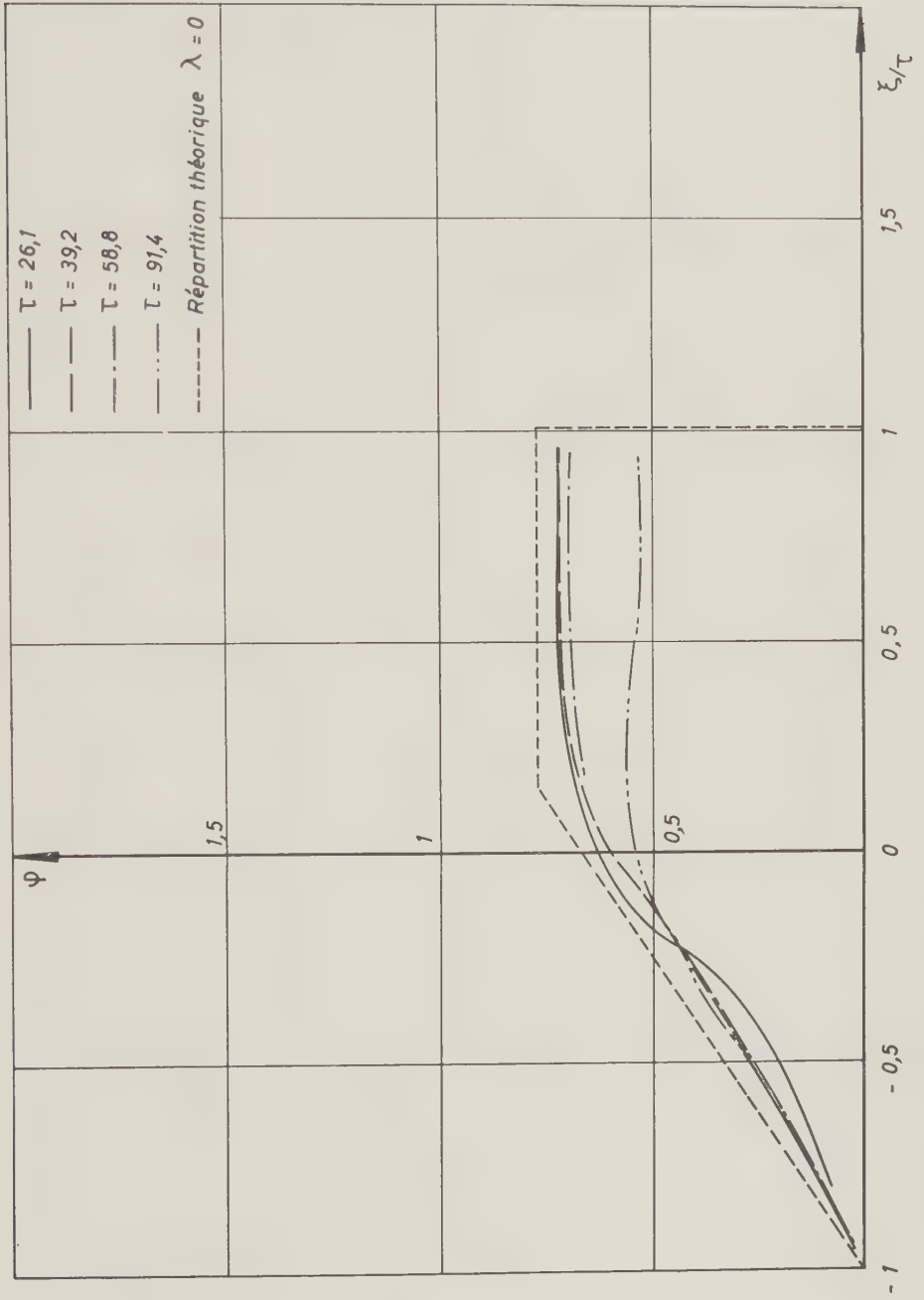
Répartitions longitudinales des vitesses (présentation adimensionnelle)

ESSAI 3 B $\eta_0 = 0,043$



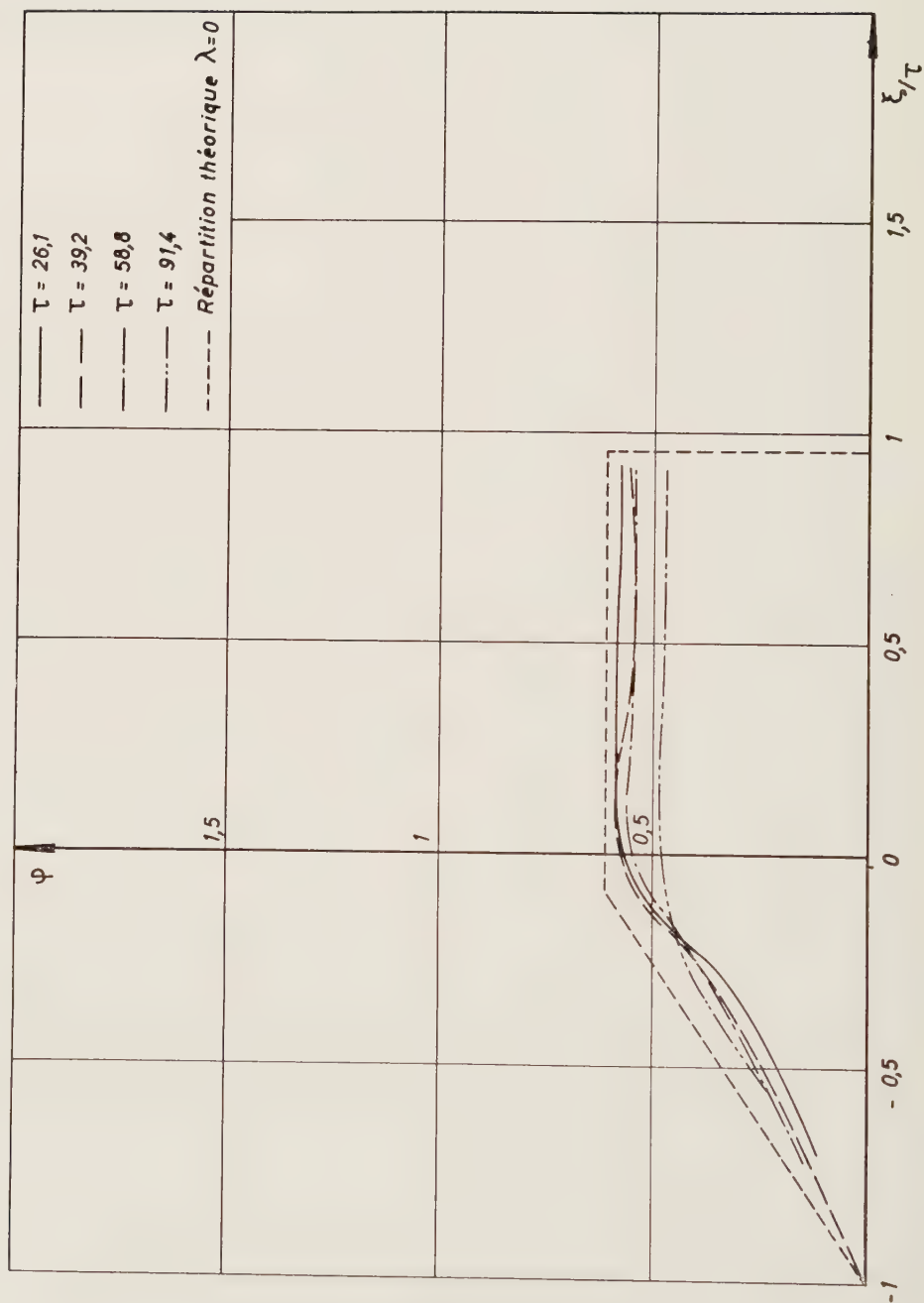
Répartitions longitudinales des vitesses (présentation adimensionnelle)

ESSAI 4 B $\eta_0 = 0,087$



Répartitions longitudinales des vitesses (présentation adimensionnelle)

ESSAI 5 B $\eta_0 = 0,174$



Répartitions longitudinales des vitesses (présentation adimensionnelle)

ESSAI 6 B $\eta_0 = 0,348$

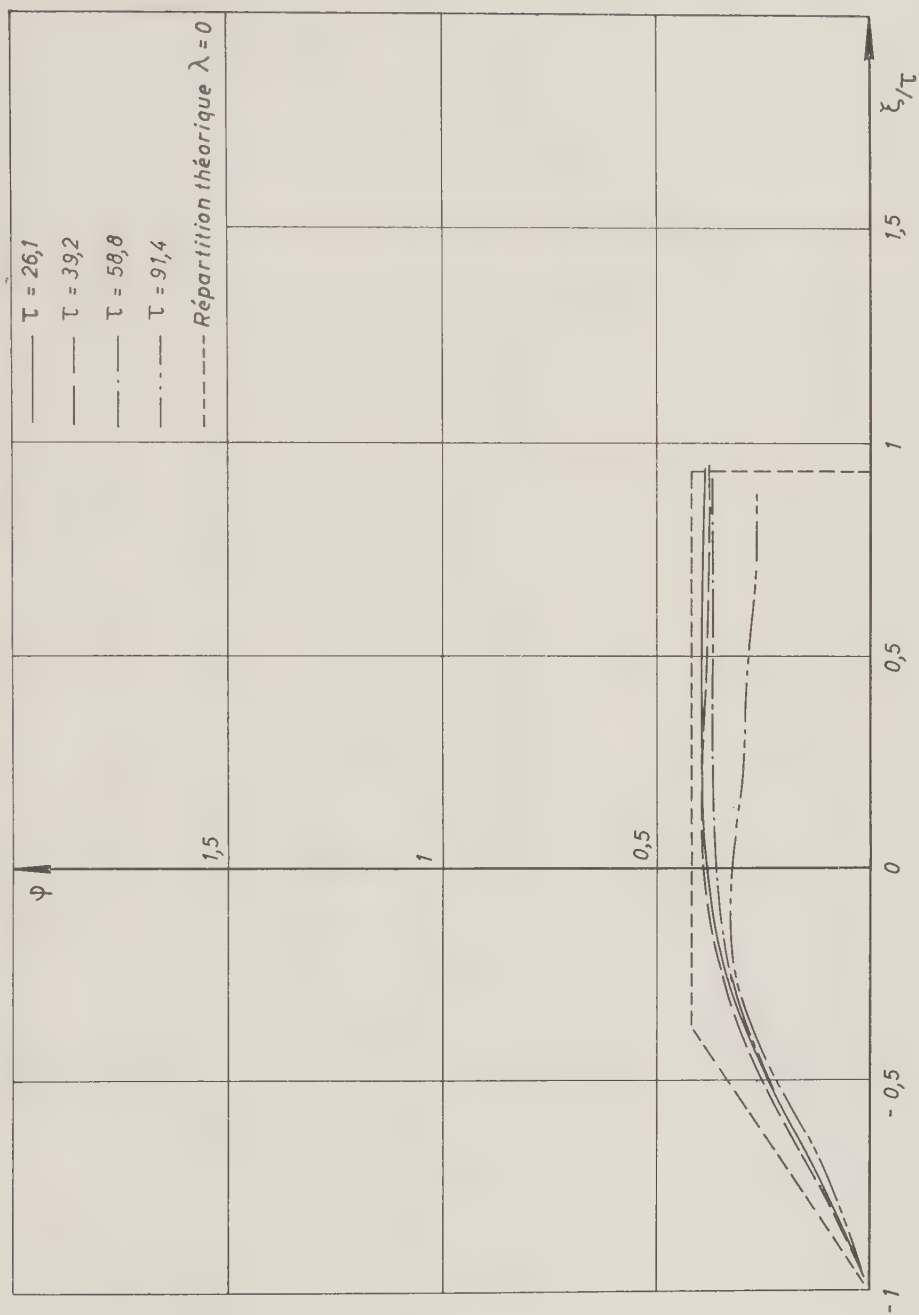


PLANCHE 70

Répartitions longitudinales des vitesses (présentation adimensionnelle)

ESSAI 7 B $\gamma_0 = 0,700$

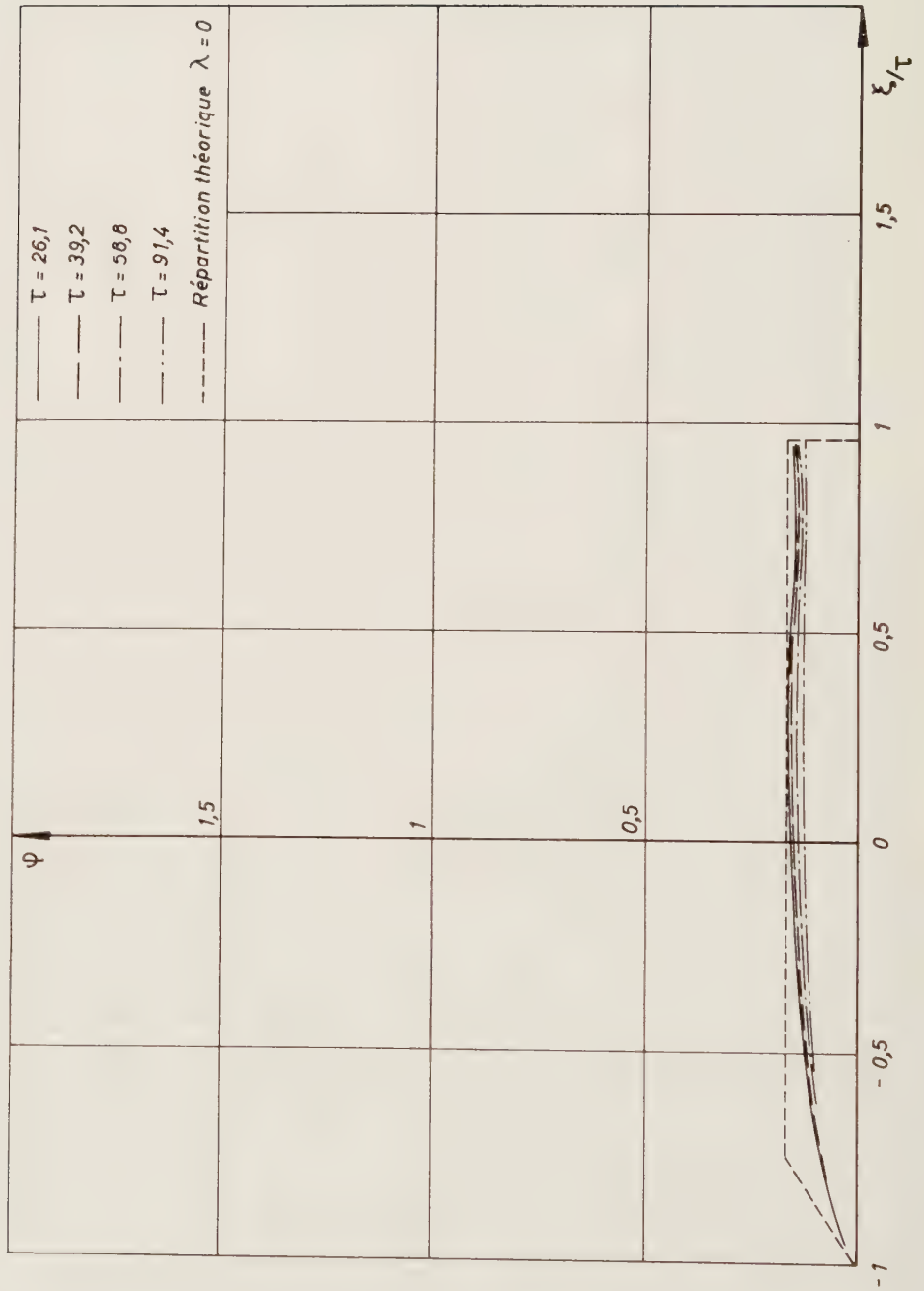


PLANCHE 71

Répartitions longitudinales des vitesses (présentation adimensionnelle)

ESSAI 1 C $\gamma_0 = 0$

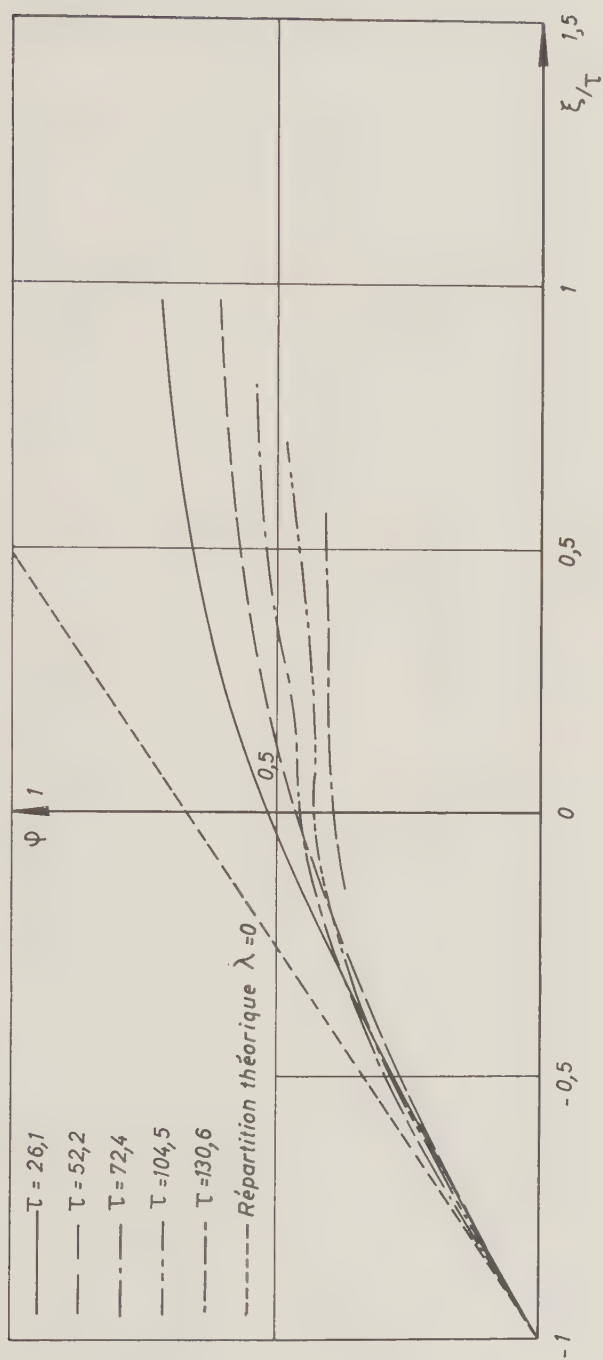


PLANCHE 72

Répartitions longitudinales des vitesses (présentation adimensionnelle)

ESSAI 2 C γ_0 0,043

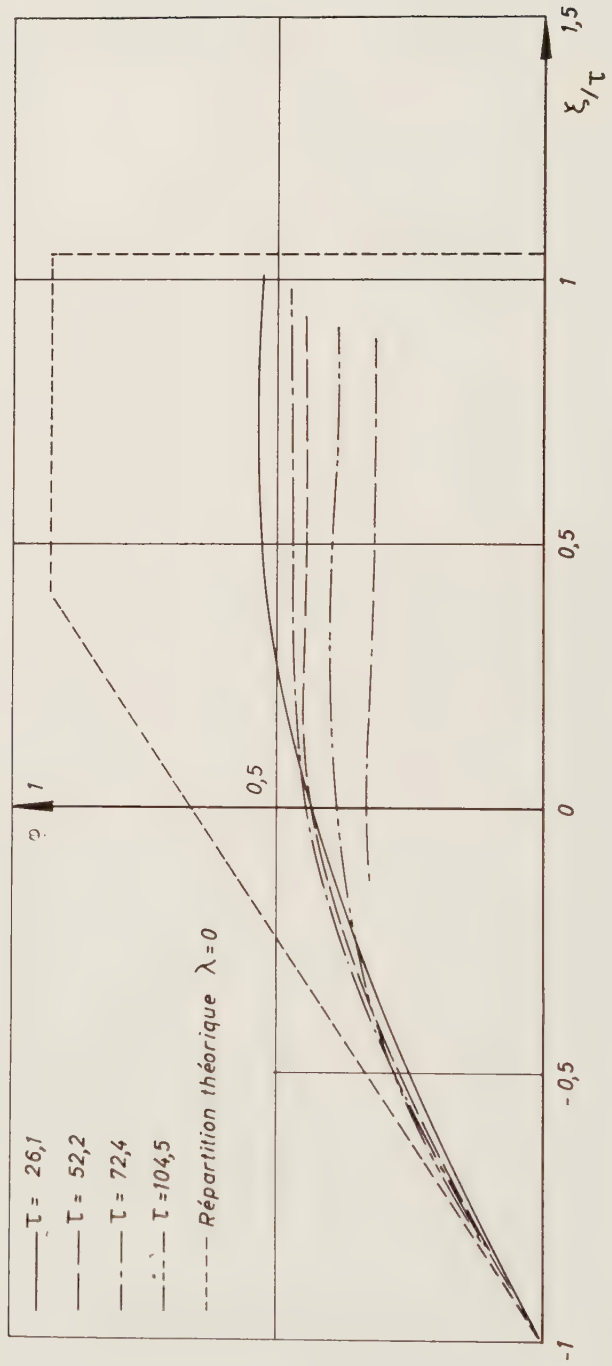


PLANCHE 73

Répartitions longitudinales des vitesses (présentation adimensionnelle)

ESSAI 3 C $\eta_0 = 0,174$

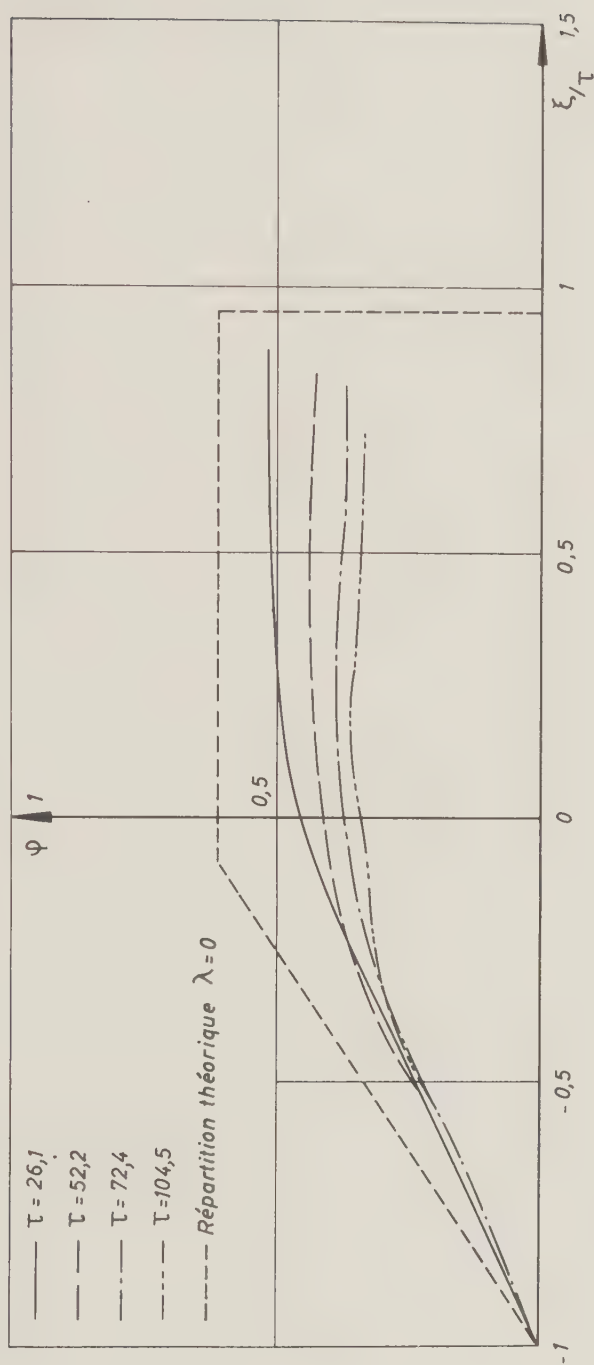


PLANCHE 74

Répartitions longitudinales des vitesses (présentation adimensionnelle)

ESSAI 4 C $\eta_0 = 0,700$

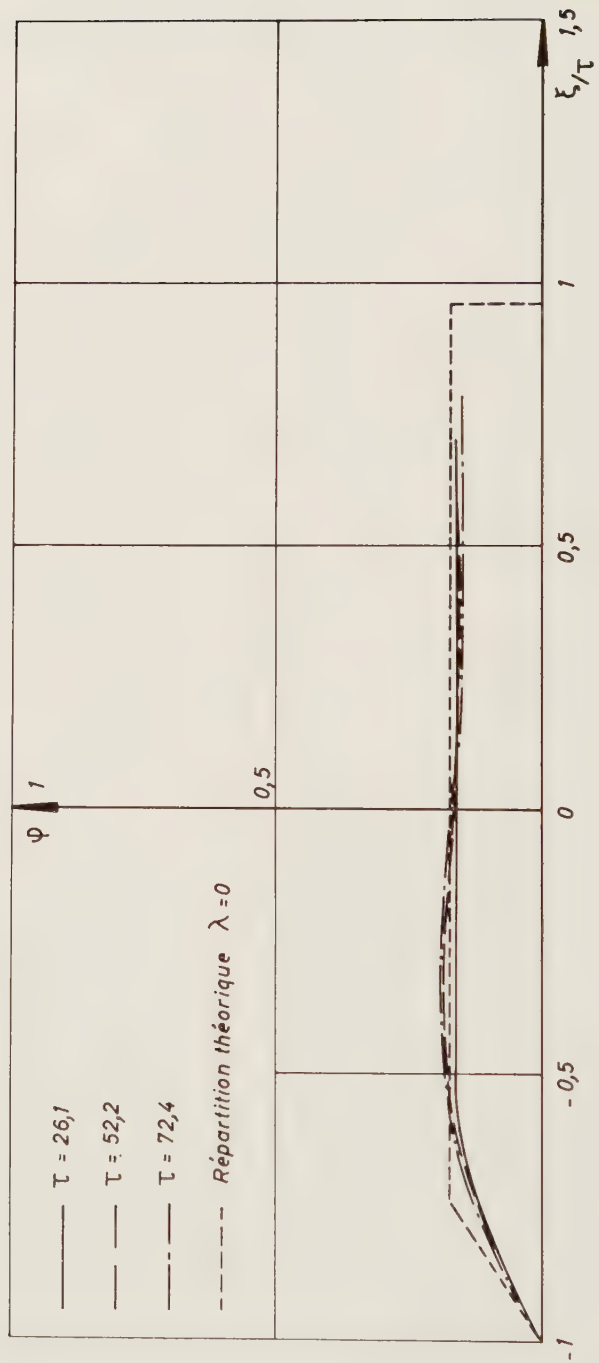


PLANCHE 75

Répartitions longitudinales du nombre de Froude

(Présentation adimensionnelle)

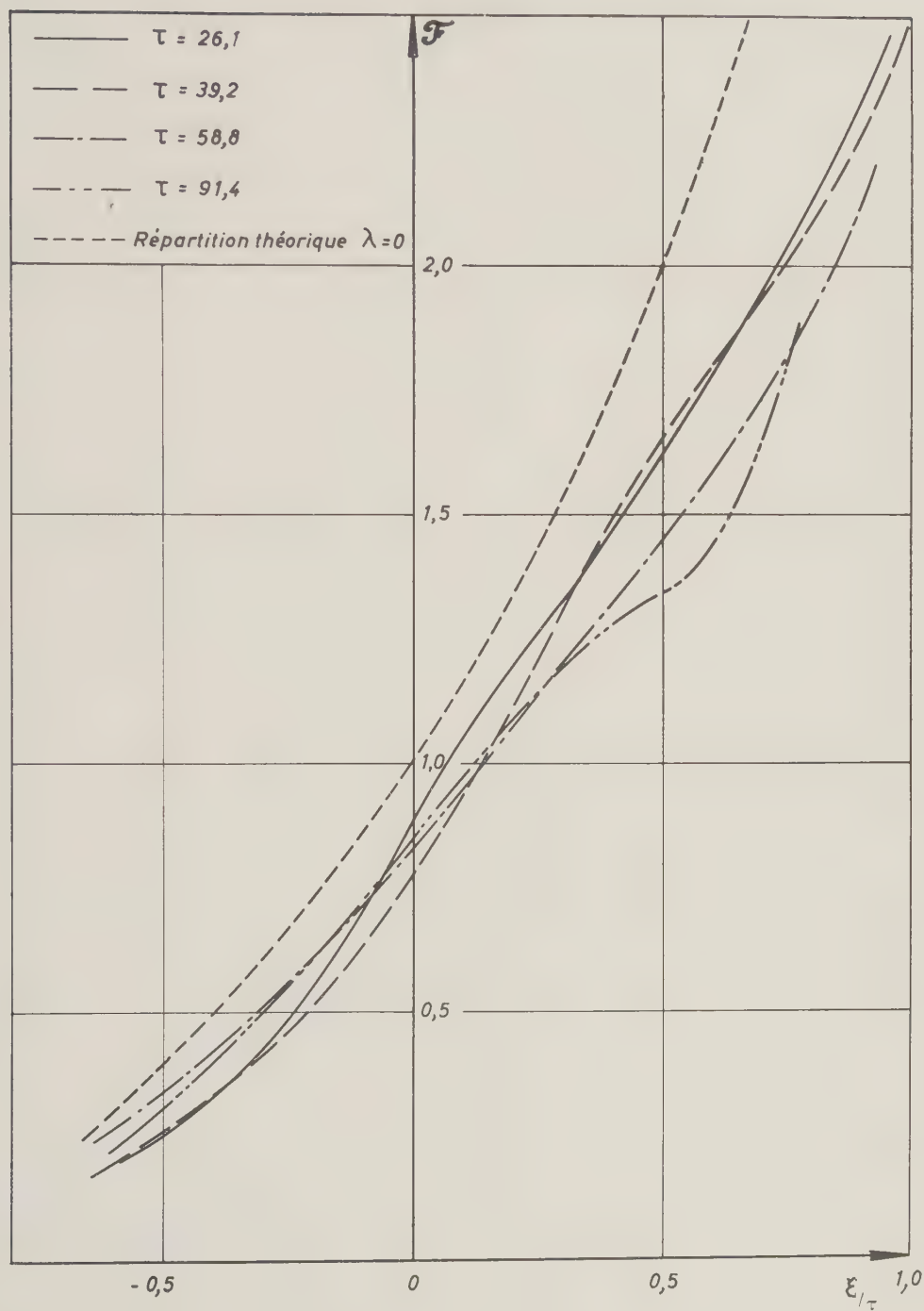
ESSAI 1 B $\eta_0 = 0$ 

PLANCHE 76

Répartitions longitudinales du nombre de Froude

ESSAI 3 B $\eta_0 = 0,043$

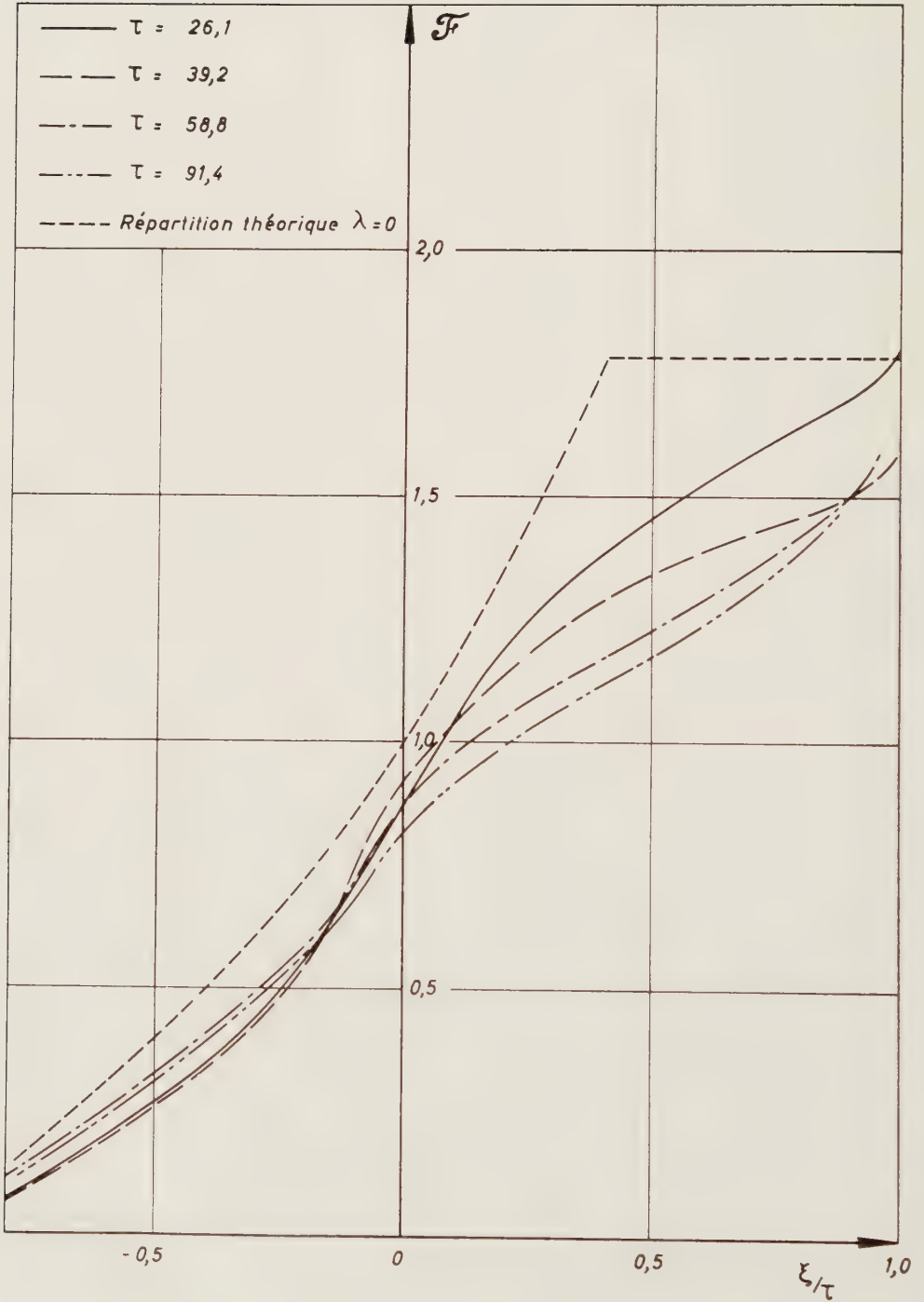


PLANCHE 77

Répartitions longitudinales du nombre de Froude

ESSAI 5 B $\eta_0 = 0,174$

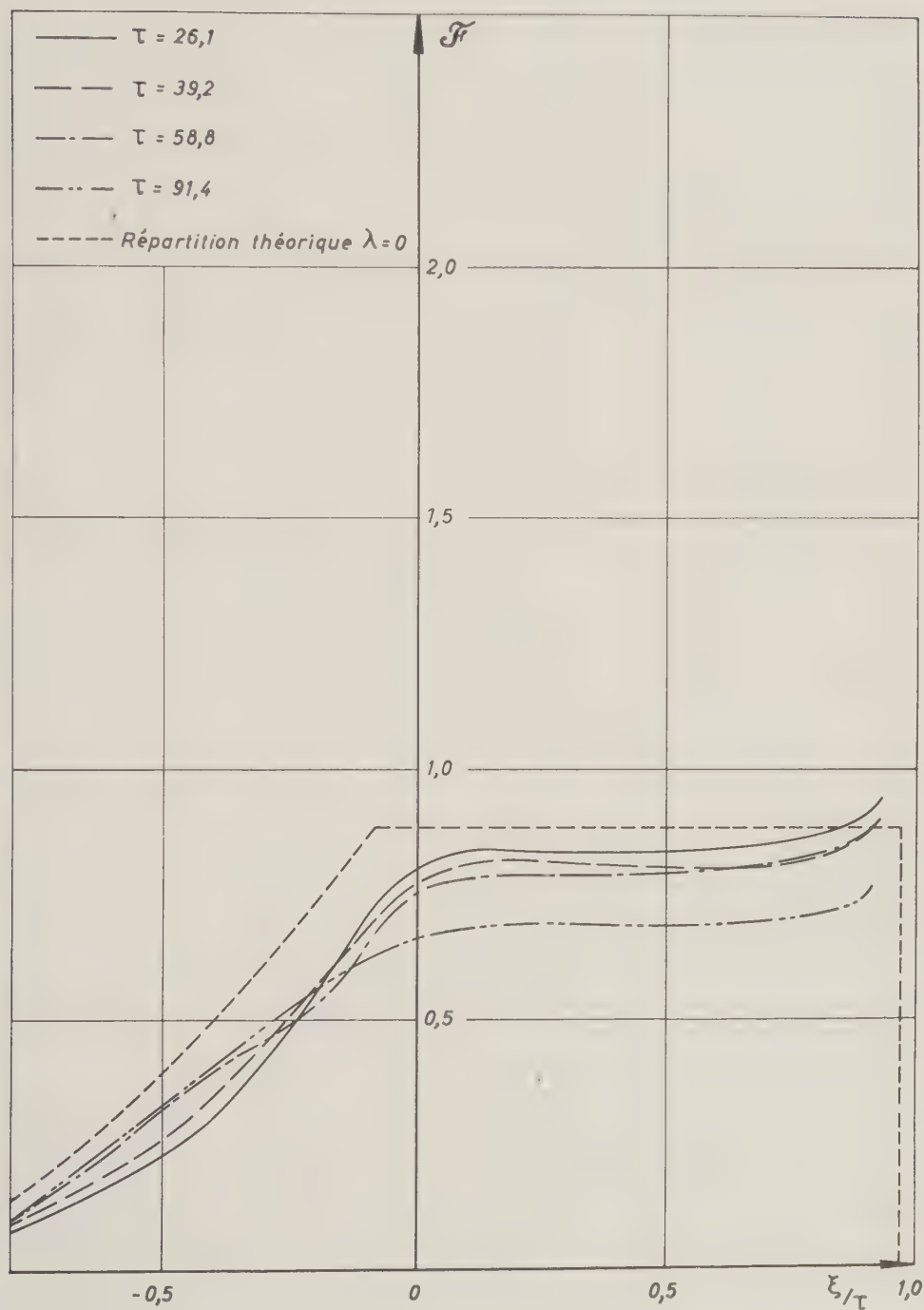


PLANCHE 78

Répartitions longitudinales du nombre de Froude

ESSAI 7 B $\nu_0 = 0,700$

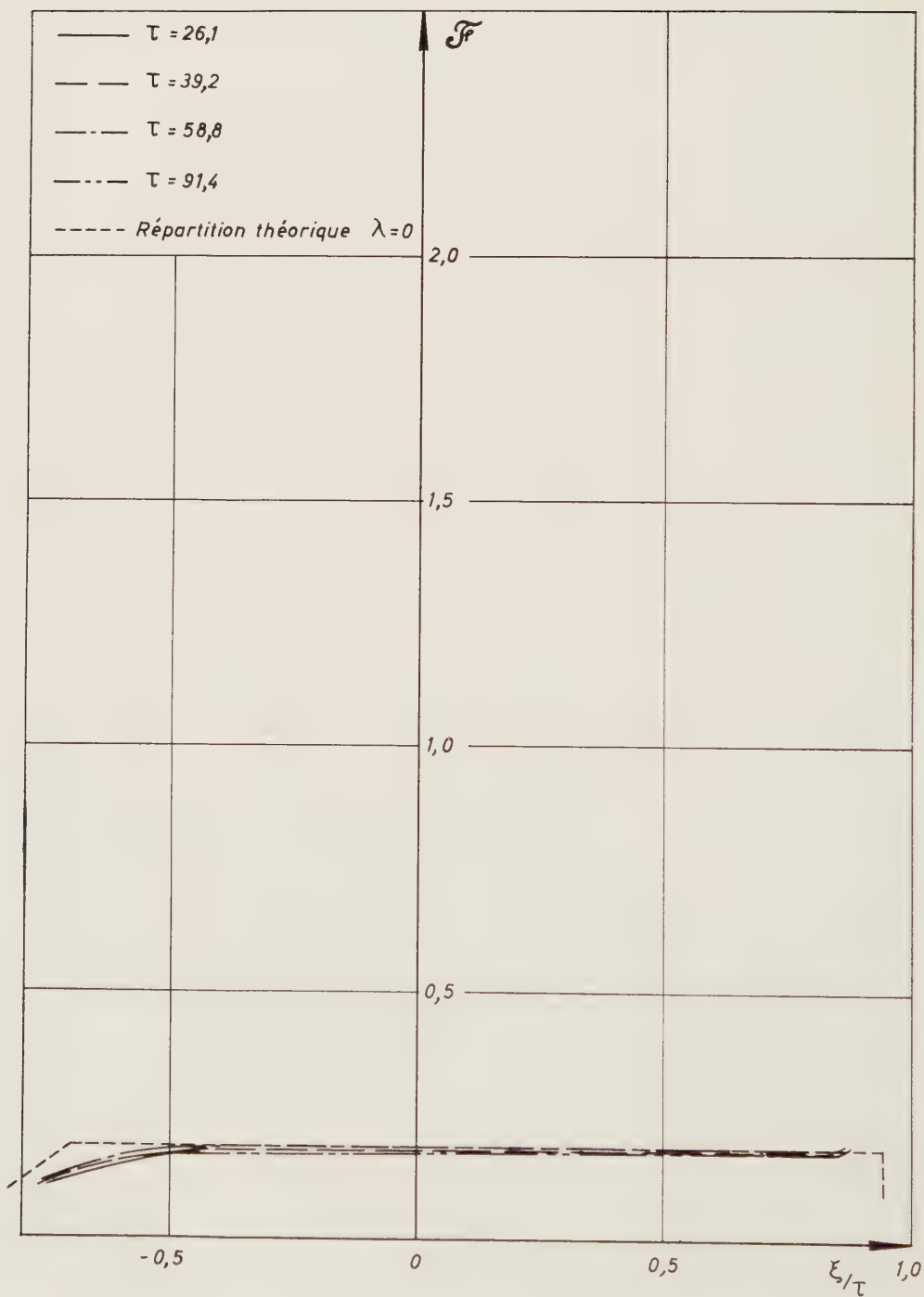


PLANCHE 79

Répartitions longitudinales du nombre de Froude

ESSAI 1 C $\eta_0 = 0$

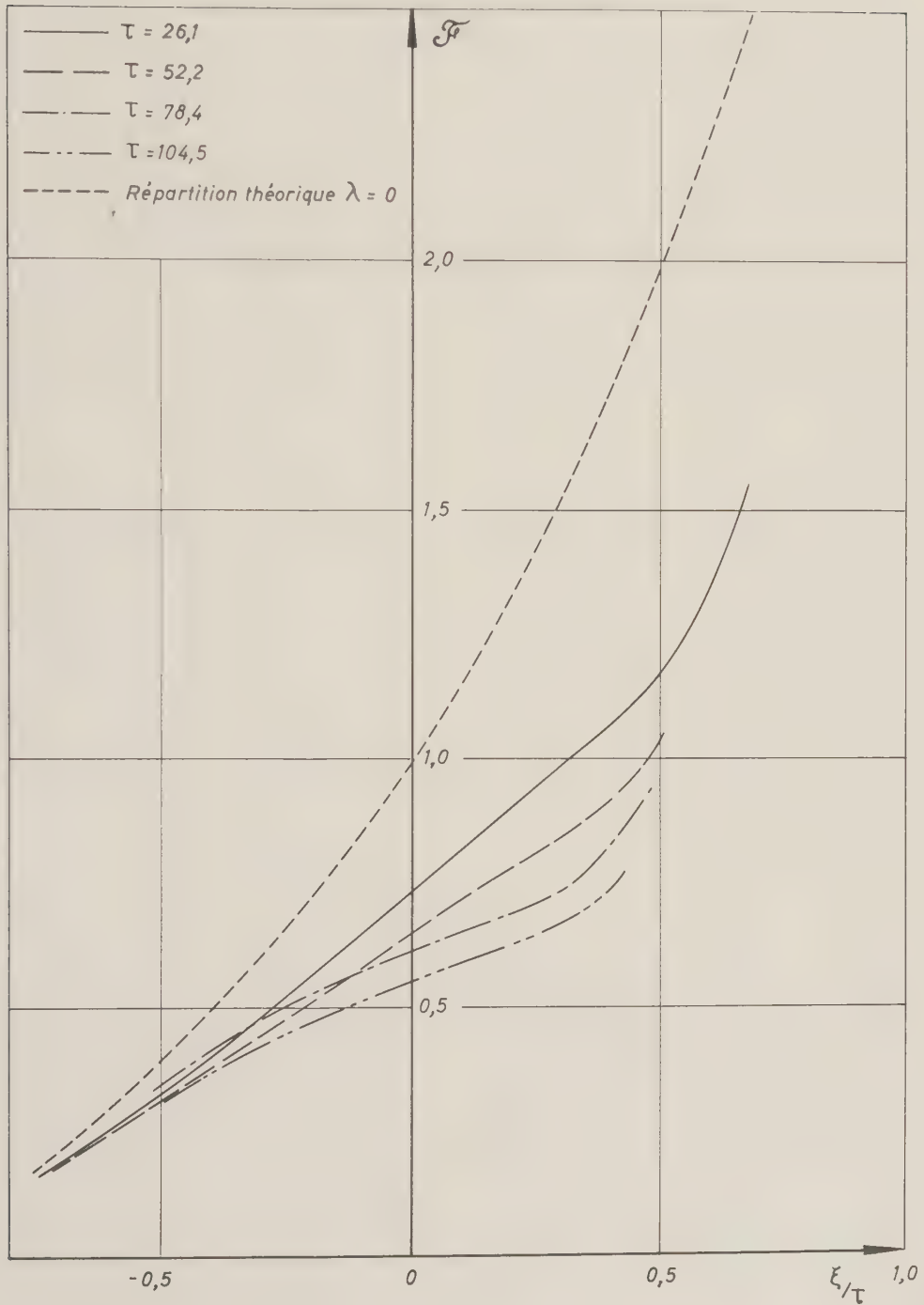


PLANCHE 80

Répartitions longitudinales du nombre de Froude

ESSAI 2 C $\eta_0 = 0,043$

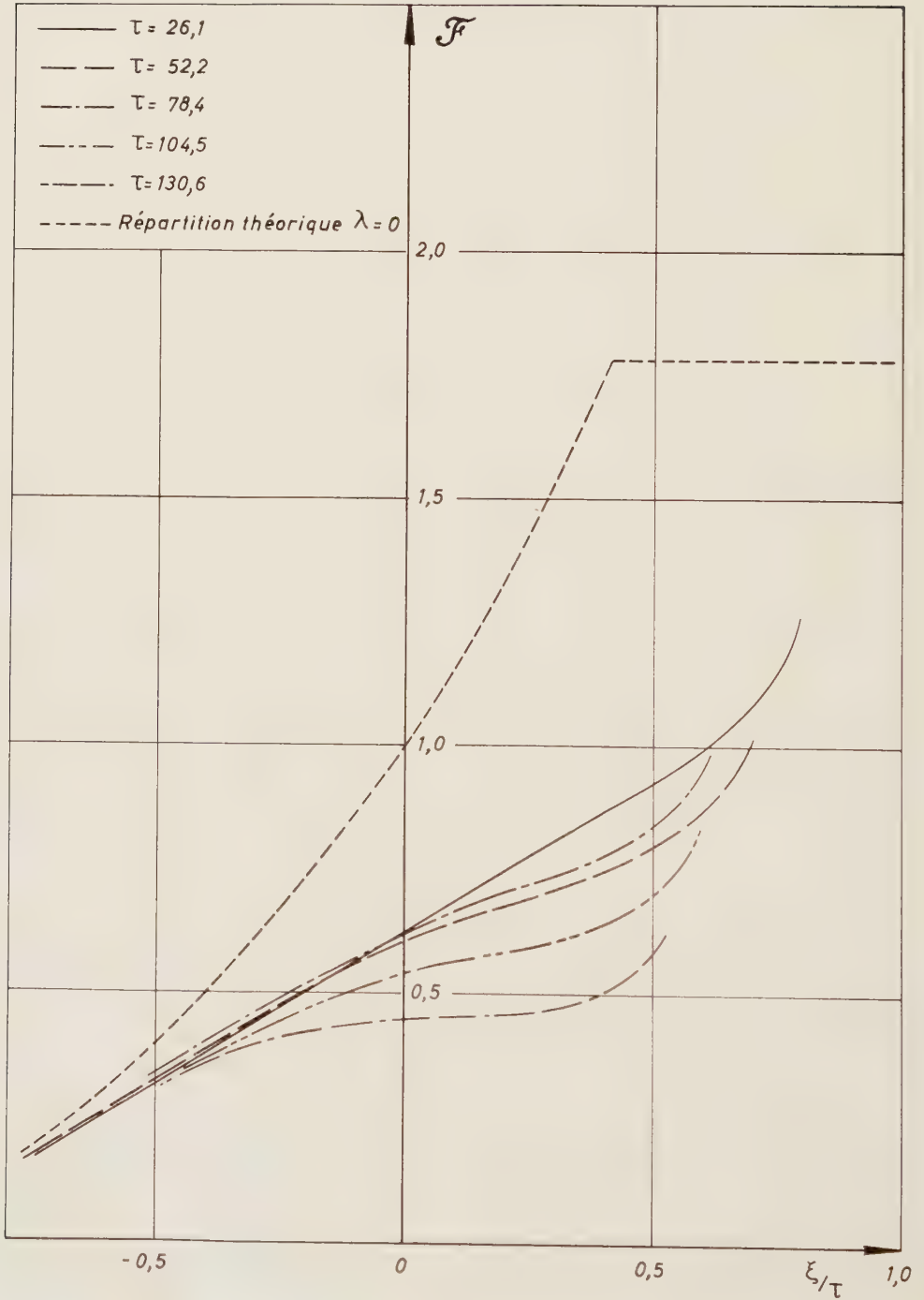


PLANCHE 81

Répartitions longitudinales du nombre de Froude

ESSAI 3 C $\eta_0 = 0,174$

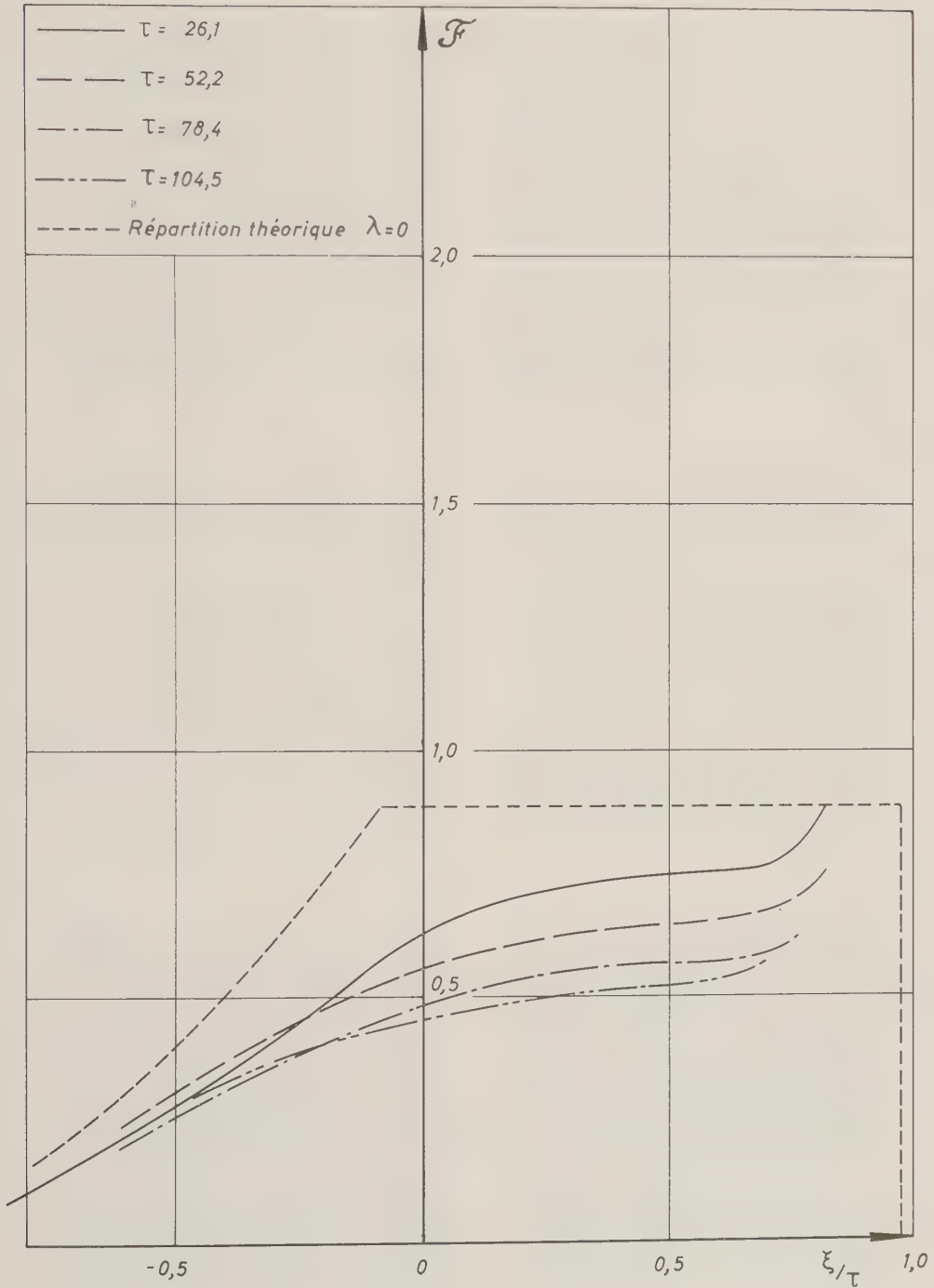


PLANCHE 82

Répartitions longitudinales du nombre de Froude

ESSAI 4 C $\eta_0 = 0,700$

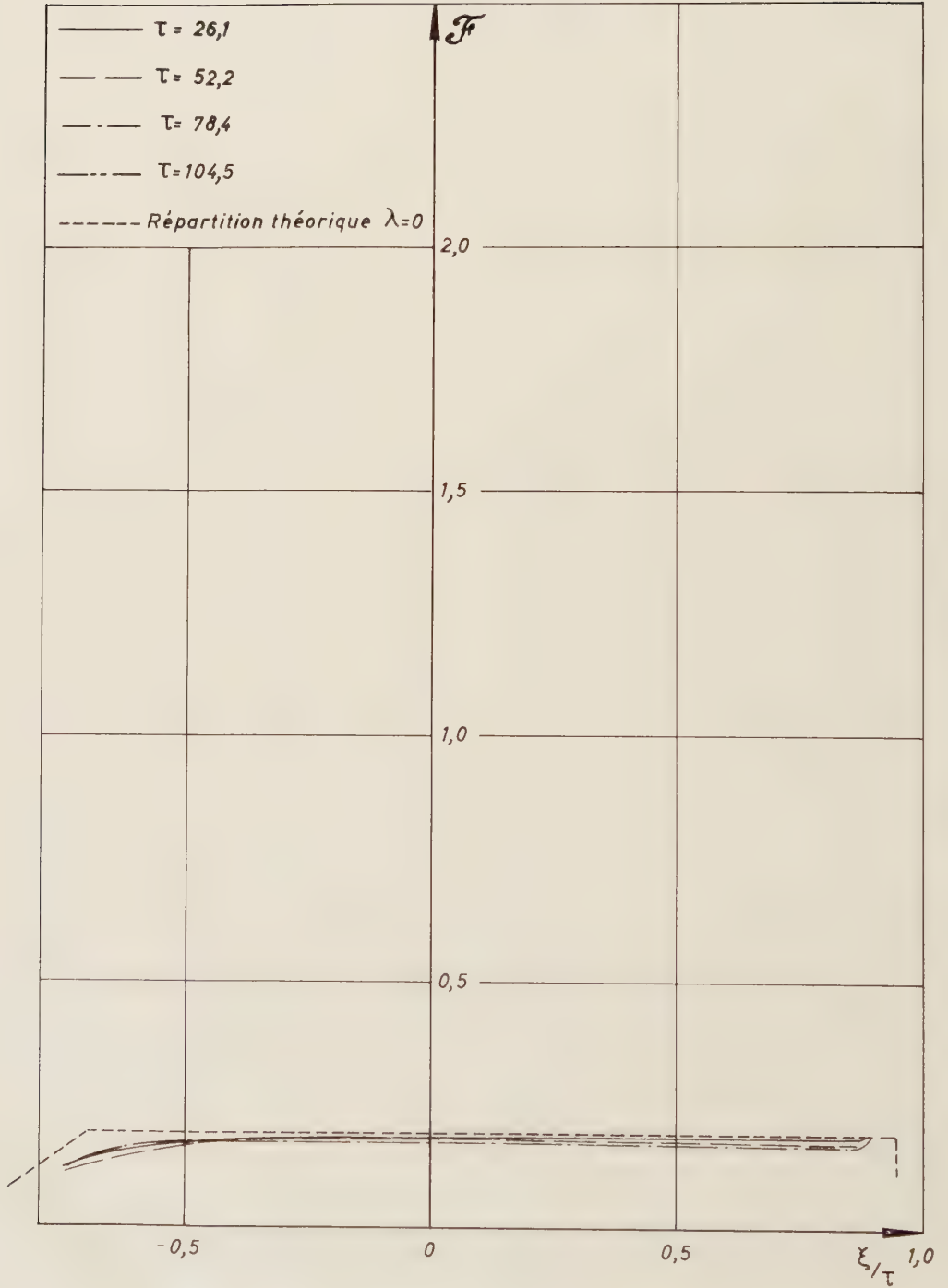


PLANCHE 83

Photographies de l'écoulement au voisinage de la vanne

(L'instant t de la prise de vue est compté à partir du début du lever de vanne)

ESSAI 1 B

$\eta_0 = 0$

ESSAI 2 B

$\eta_0 = 0,021$

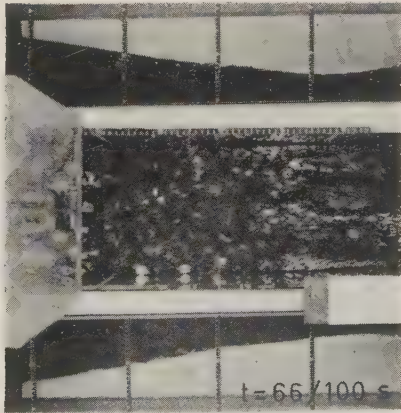
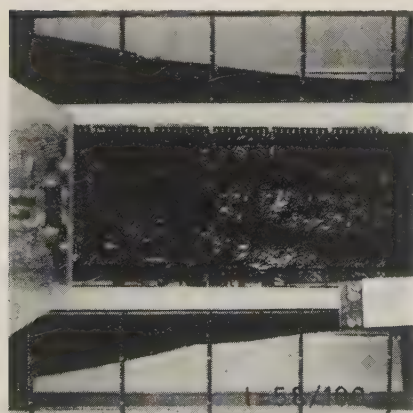
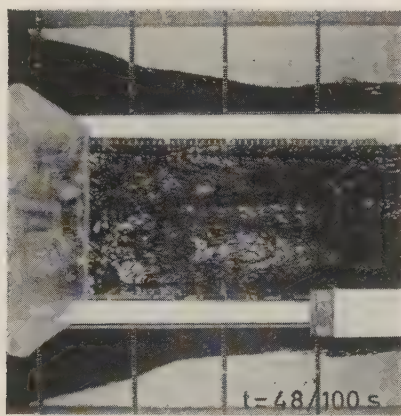
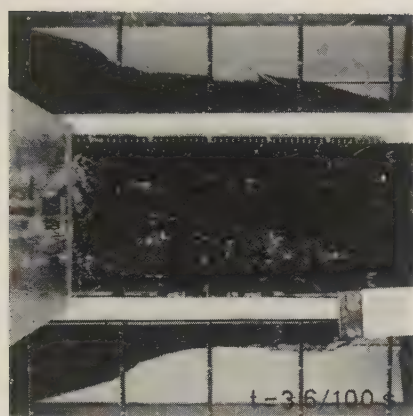
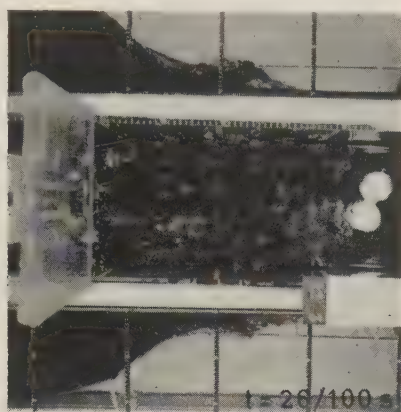
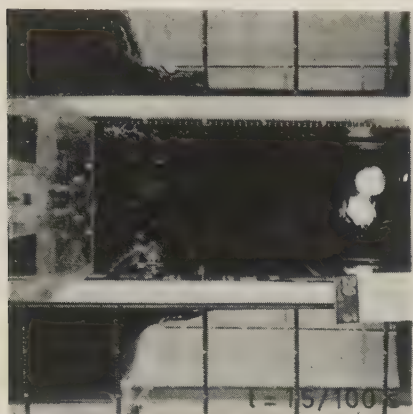


PLANCHE 83 (suite)

Photographies de l'écoulement au voisinage de la vanne

(L'instant t de la prise de vue est compté à partir du début du lever de vanne)

ESSAI 3 B

$\eta_0 = 0,043$

ESSAI 4 B

$\eta_0 = 0,087$

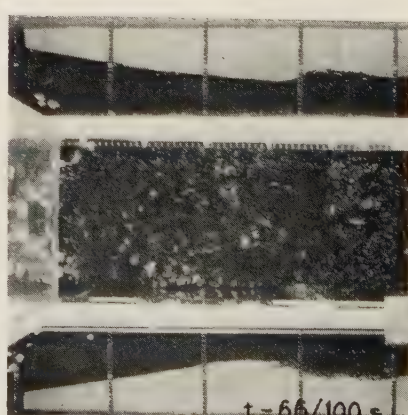
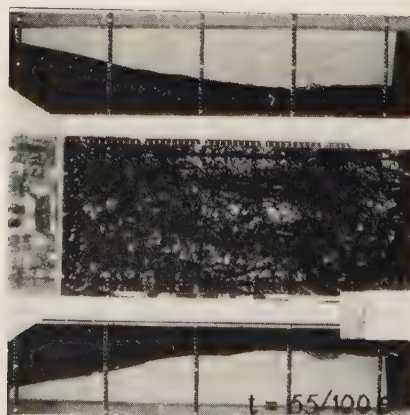
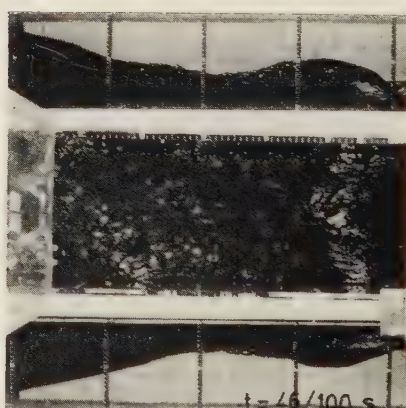
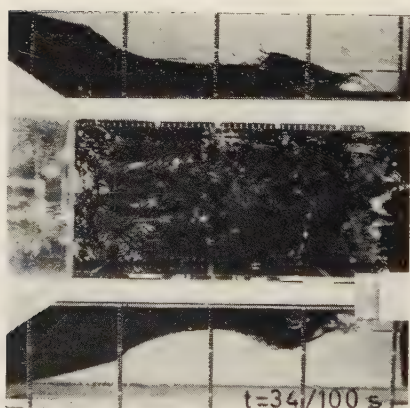


PLANCHE 83 (suite)

Photographies de l'écoulement au voisinage de la vanne(L'instant t de la prise de vue est compté à partir du début du lever de vanne)

ESSAI 5 B

 $\eta_0 = 0,174$

ESSAI 6 B

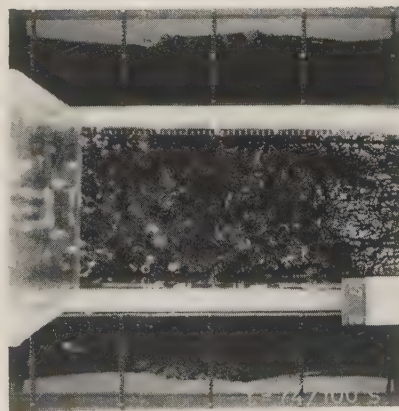
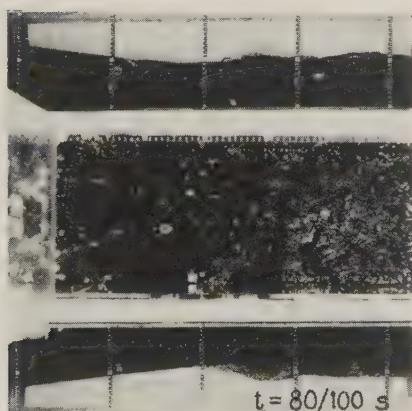
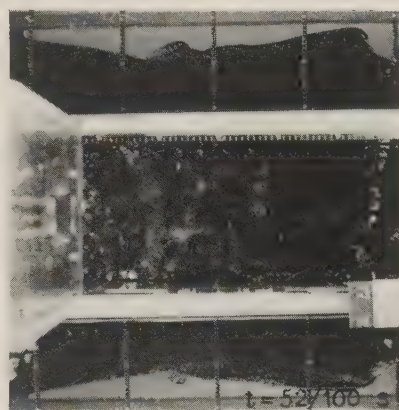
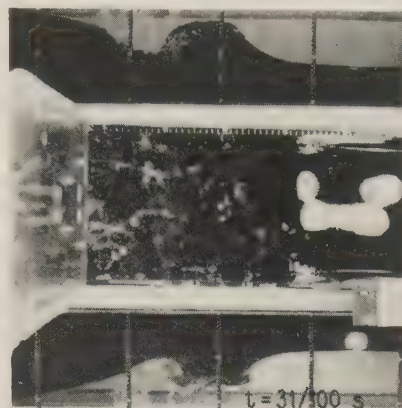
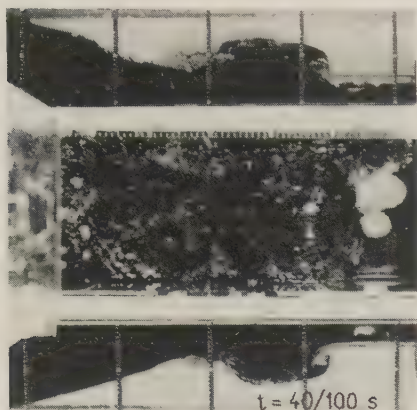
 $\eta_0 = 0,318$ 

PLANCHE 83 (suite)

Photographies de l'écoulement au voisinage de la vanne

(L'instant t de la prise de vue est compté à partir du début du lever de vanne)

ESSAI 7 B

$\eta_0 = 0,700$

ESSAI 8 B

$\eta_0 = 0$

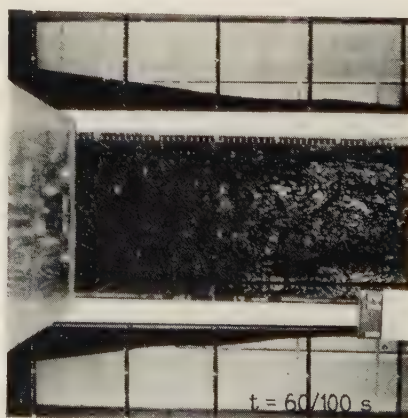
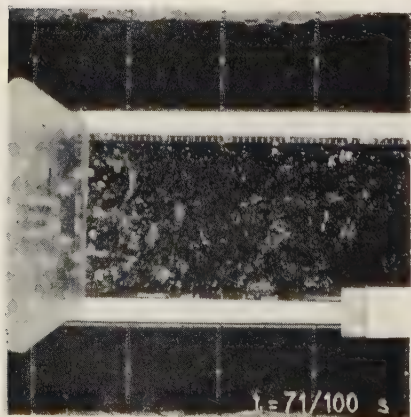
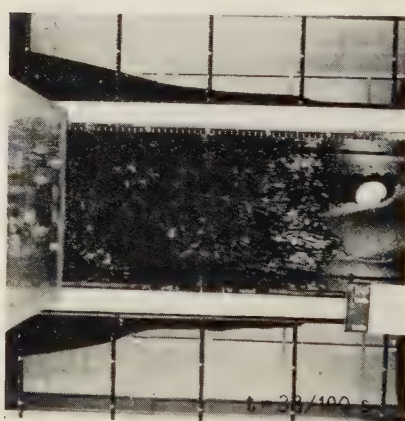
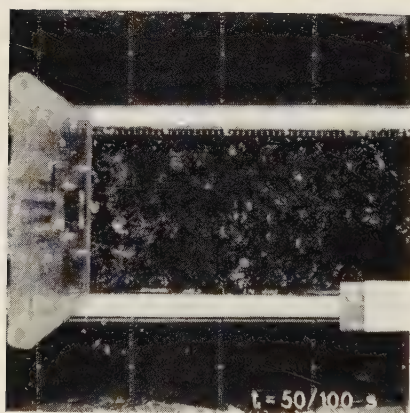
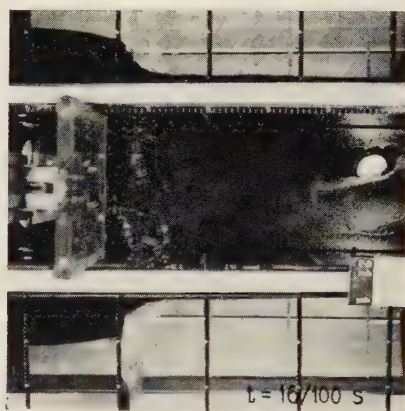
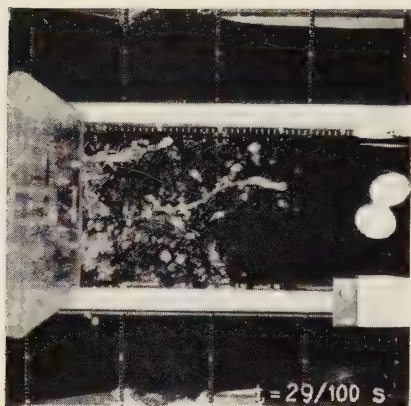


PLANCHE 84

Photographies de l'écoulement au voisinage de la vanne

(L'instant t de la prise de vue est compté à partir du début du lever de vanne)

ESSAI 1 C

$\eta_0 = 0$

ESSAI 2 C

$\eta_0 = 0,043$

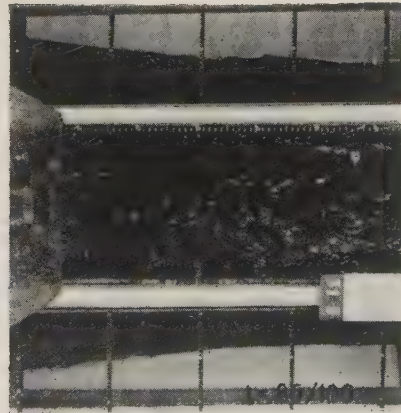
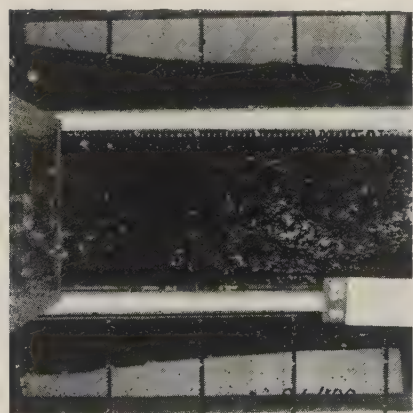
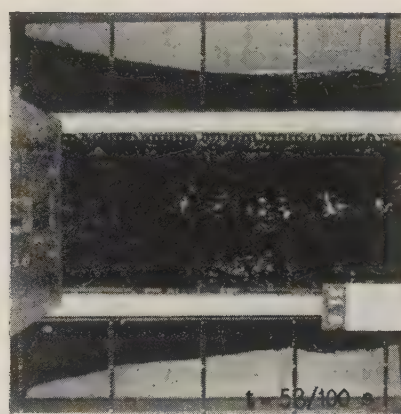
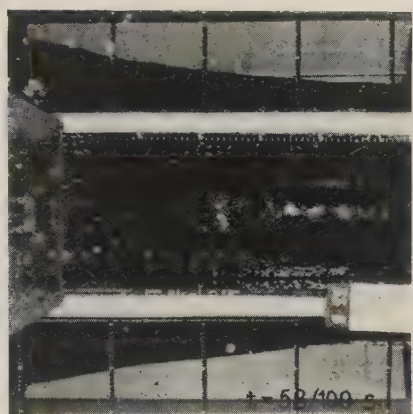
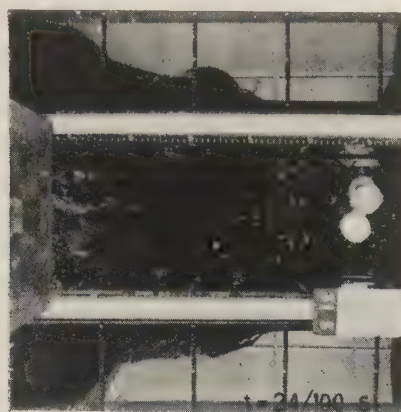
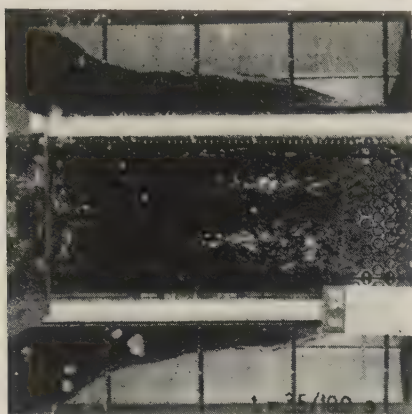


PLANCHE 84 (suite)

Photographies de l'écoulement au voisinage de la vanne(L'instant t de la prise de vue est compté à partir du début du lever de vanne)

ESSAI 3 C

 $\eta_0 = 0,174$

ESSAI 4 C

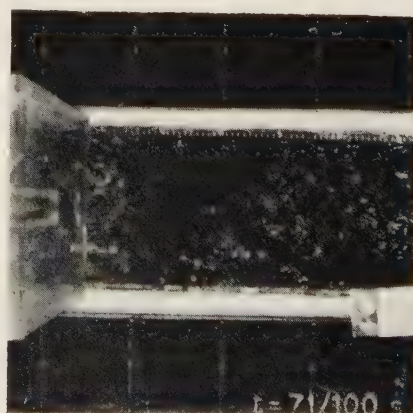
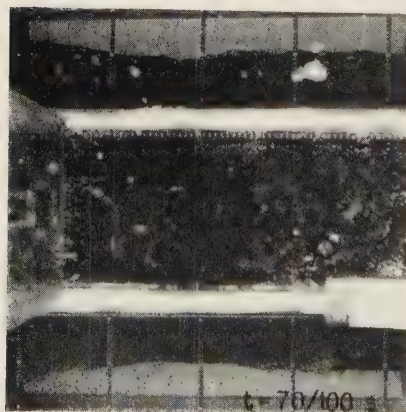
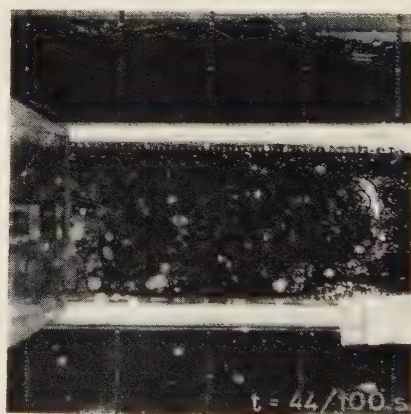
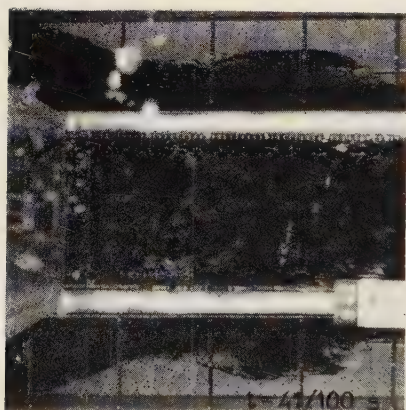
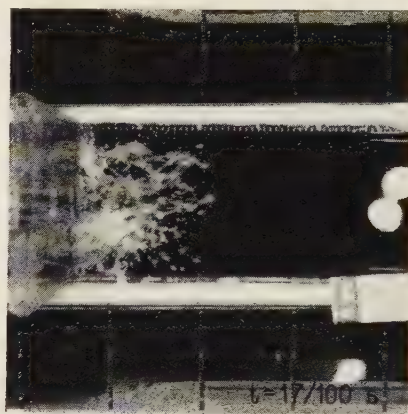
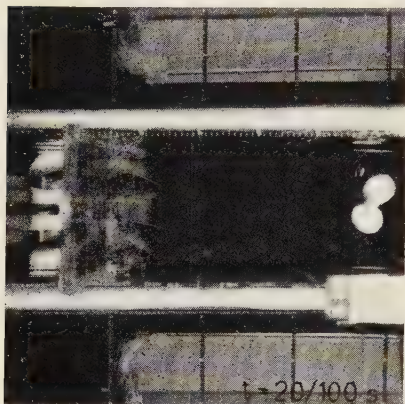
 $\eta_0 = 0,700$ 

PLANCHE 85

Ondes secondaires

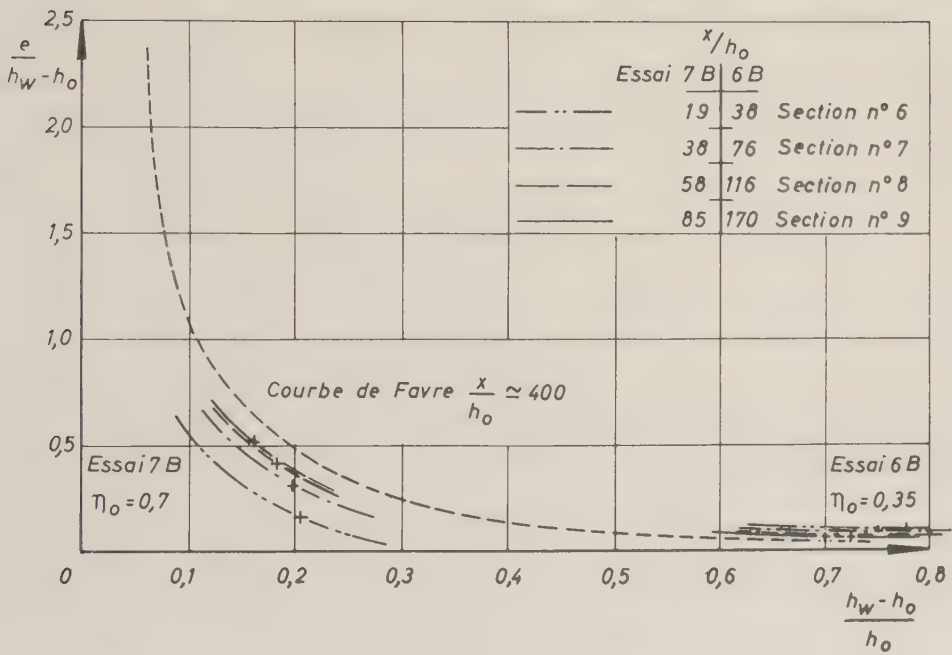
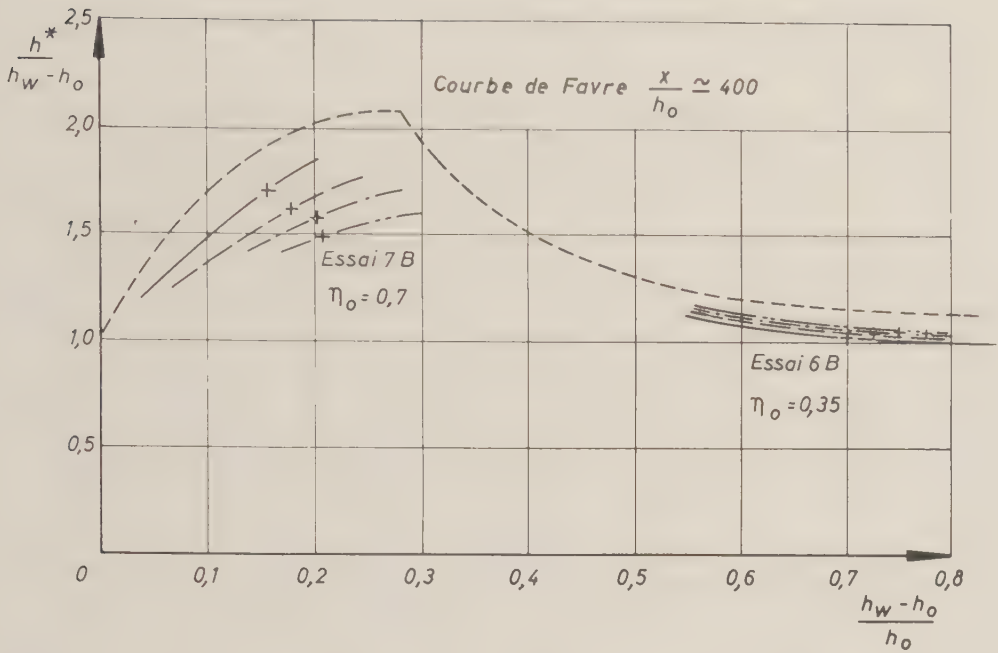
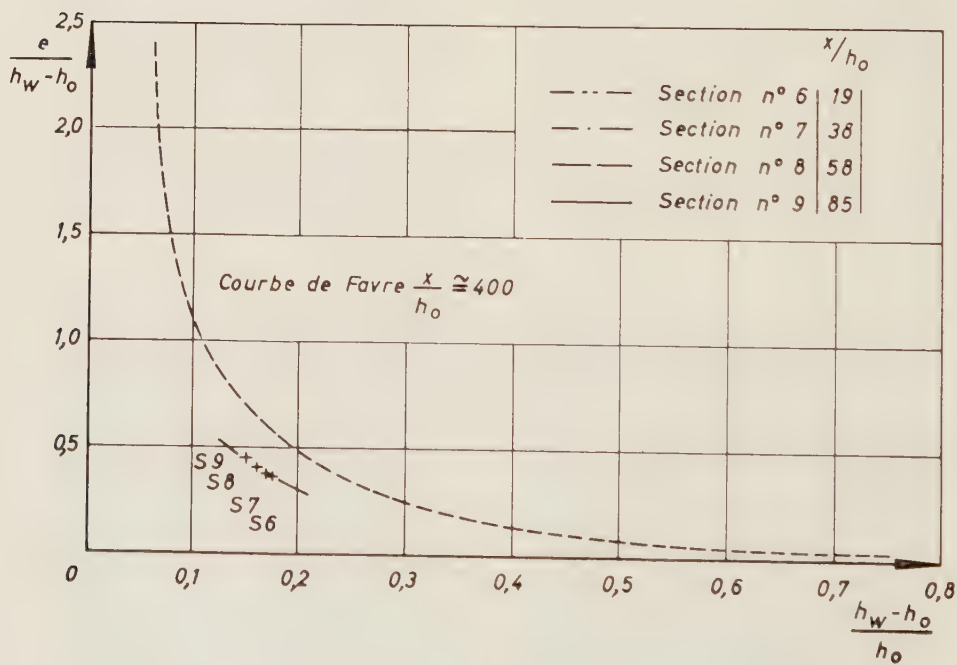
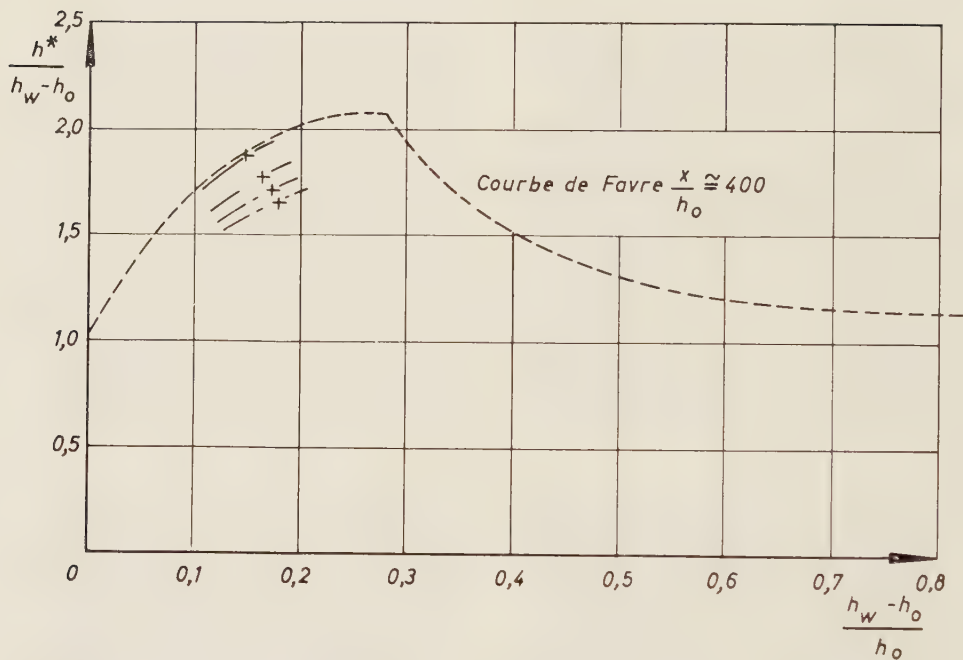


PLANCHE 86

Ondes secondaires

ESSAI 4 C $\eta_0 = 0,7$



BIBLIOGRAPHIE

- [1] BARRÉ DE SAINT-VENANT. — *Théorie du mouvement non permanent des eaux avec application aux crues des rivières et à l'introduction des marées dans leur lit*. C.R. de l'Académie des Sciences, t. 73 (1871).
- [2] Ph. DEYMIÉ. — *Propagation d'une intumescence allongée*. Revue Générale de l'Hydraulique (1935).
- [3] P. MASSÉ. — *Le problème du mascaret*. Revue Générale de l'Hydraulique (1936).
- [4] A. RITTER. — *Des intumescences dans les torrents*. Revue Générale de l'Hydraulique (1937).
- A. RITTER. — *Die Fortpflanzung der Wasserwellen*. V.D.I. (1892).
- [5] R. F. DRESSLER. — *Influence de la résistance hydraulique sur les conditions de rupture d'un barrage*. Journal of Research, 49, n° 3 (sept. 1952). Traduction E.D.F., n° 525.
- [6] G. B. WHITHAM. — *Les effets de la résistance hydraulique dans le problème de la rupture de barrage*. Proc. of the Royal Society, n° 1170 (janvier 1955). Traduction E.D.F., n° 536.
- [7] R. F. DRESSLER. — *Comparaison des théories et des expérimentations relatives aux ondes dues aux ruptures de barrage*. Union Géodésique et Géophysique Internationale. Assemblée Générale, Rome, t. 3 (1954). Traduction E.D.F., n° 526.
- [8] R. F. DRESSLER. — *Ondes non linéaires et non permanentes dans un canal en pente*. U.S. Department of Commerce, N.B.S. (1958). Traduction E.D.F., n° 658.
- [9] A. CRAYA. — *Calcul graphique des régimes variables dans les canaux*. Houille blanche (novembre 1945-janvier 1946).
- [10] J. FAURE et N. NAHAS. — *Étude numérique et expérimentale d'intumescences à forte courbure du front*. Houille Blanche, n° 5 (octobre 1961).
- [11] F. V. POHLE. — *Thesis Mathematics*. Dept. New York University (1950).
- [12] R. RÉ. — *Étude du lâcher instantané d'une retenue d'eau dans un canal par la méthode graphique*. Houille Blanche (mai 1946).
- [13] H. FAVRE. — *Étude théorique et expérimentale des ondes de translation dans les canaux découverts*. Dunod, Paris (1951).
- [14] A. SCHOKLITSCH. — *A propos d'ondes de rupture de barrages*. Sitzungsberichte der K. Akademie der Wissenschaften, vol. 126 (1917). Traduction E.D.F., n° 519.
- [15] L. LÉVIN. — *Mouvement non permanent sur les cours d'eau à la suite de rupture de barrage*. R.G.H. (1952).
- [16] N. M. VOLKOFF. — *Formation d'une onde lors d'un déversement dans un lit à sec*. Izvestia Akad. Naouk Kajakhstan, série Énergétique, n° 2 (1956). Traduction E.D.F., n° 574.

DEUXIEME THÈSE

Propositions données par la Faculté

LES HYDROCYCLONES

Vu et approuvé :

Paris, le 20 Mai 1964.

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

Marc ZAMANSKY.

Vu et permis d'imprimer :

Le Recteur de l'Académie de Paris,

Jean ROCHE.



SEDOCAR



IMPRIMERIE